

마찰 에너지 해석을 통한 러버 트랙(Rubber Track)의 마모율 예측

강 종 진^{*1)} · 조 진 래²⁾ · 정 의 봉³⁾

동일고무벨트 언더캐리지사업팀¹⁾ · 마이다스아이티 기술연구소²⁾ · 부산대학교 기계공학부³⁾

Prediction of Wear Rate for Rubber Track by Using Frictional Energy Analysis

Jongjin Kang^{*1)} · Jinrae Cho²⁾ · Weuibong Jeong³⁾

¹⁾Undercarriage Business Team, Dongil Rubber Belt Co. Ltd., Geumsa-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-721, Korea

²⁾Research & Development Institute of Midas IT, Sampyeong-dong, Bundang-gu, Gyeonggi 463-400, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 26 January 2011 / Accepted 30 March 2011)

Abstract : The wear of rubber track being in contact with the road surface is an important subject because it decreases the traction performance and the operating efficiency of tracked vehicle. For the above reasons, many attempts have been made to quantitatively calculate the rubber track. However, it depends on the experimental methods which are highly time- and cost-consuming. Therefore, the numerical simulation approach is highly desirable, but it needs to model the complex geometry and the material behavior in details as well as the interaction with the road surface. In this study, the rubber track and its material behavior are elaborately modeled since these factors are very important in the prediction of the wear rate of the rubber track. Accordingly to the studies on the rubber wear by previous investigations, it has been found that the wear is greatly influenced by the frictional energy. The frictional energy of rubber track is computed by utilizing the 3D finite element analysis of the rubber track, and the wear rate is evaluated making use of the frictional energy and a wear model.

Key words : Rubber track(러버 트랙), Wear rate(마모율), Frictional energy(마찰 에너지), Wear model(마모 모델), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서 론

러버 트랙(rubber track)은 고무와 금속 심금(metal core) 및 스틸 코드(steel cord)로 조합되어 제작되며 콤팩트, 운반차, 굴삭기, 제설차 등의 농업 및 건설용 기계의 바퀴 부품으로 사용되는 무한궤도 트랙이다. 특히 굴삭기에서 스틸 트랙(steel track)의 대체품으로 사용되어 소음과 진동을 개선시킴으로써 작업자의 승차감을 향상시켜 주고 연약 지반에서 지면의 손상 없이 작업을 가능하게 해준다.

하지만 주로 고무로 만들어진 러버 트랙의 특성상

장비의 하중을 지지하는 롤러와 지면과의 높은 접촉 압력에 의해 마모와 손상이 일어나게 된다. 이러한 러버 트랙의 마모와 손상은 장비에 과중한 부하를 주게 되어 견인력을 저하시키며 결국 새로운 러버 트랙으로 교체되어야 하므로, 추가 비용이 발생하고 작업자의 작업 능률을 떨어뜨리는 원인이 된다.¹⁾

따라서 러버 트랙 제조업체는 오랜 시간 사용하여도 초기 성능을 유지하는 내마모성 러버 트랙 개발의 중요성과 필요성을 인식하고 있으며 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 자동차용 타이어와는 달리 러버 트랙의 마모는 실험 장치를 이용한 실내 시험이 어려워, 주로 실외 실차 시험에 의존

*Corresponding author, E-mail: kang.jong.jin@drbworld.com

해야 하기 때문에 많은 시간과 비용이 요한다. 또한 고무의 마모는 화학적, 기계적으로 동시에 진행되는 복합적인 과정이고 마모 메커니즘도 인장 절파(tensile failure), 찢어짐(tec), 잘라짐(cutting), 피로(fatigue) 등으로 매우 복잡하여, 러버 트랙의 정확한 마모량 예측은 매우 어려운 문제이다.²⁾

하지만 고무 재료의 마모는 단단한 표면 위를 미끄러질 때 발생하는 마찰력과 밀접한 관계에 있고, 마찰력 증가는 필연적으로 내마모성의 저하를 초래하는 것으로 알려져 있다. 특히 고무 재료의 마모 속도는 마찰 에너지(frictional energy)에 크게 의존하는 것으로 알려져 있는데 마찰 일과 마모 속도를 log-log scale로 도해하였을 경우 선형 관계를 유지한다. 따라서 지면과 접지하는 러버 트랙의 마찰 에너지를 이용한다면, 러버 트랙의 마모율을 어느 정도 예측 가능하리라 확신한다.²⁾

본 연구에서는 러버 트랙의 마모와 마찰 에너지를 예측하기 위한 수치해석적 기법을 소개하고자 한다. 러버 트랙에서 발생하는 마찰 에너지를 계산하기 위하여 상용 비선형 유한요소해석 프로그램인 MSC/Marc를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다.

또한 러버 트랙의 운동 조건을 설계 변수로 설정하여 러버 트랙 표면에서 발생하는 마찰 에너지를 파라메트릭하게 분석하고, 이를 토대로 마모율 특성을 예측하고자 한다.

2. 러버 트랙의 트랙션(Traction)

2.1 러버 트랙

일반적으로 굴삭기와 콤파인 등에 사용되는 러버 트랙은 Fig. 1과 같은 구조를 가지고 있다. 러버 트랙은 크게 고무와 보강재로 구성되어 있는 폴리머 복합재료 구조물(polymer composites)이다. 고무 재료는 내마모성, 내후성, 내굴곡성이 우수하여야 하며 특히 러그 부분은 접지력을 향상시키고 진동 소음을 최소화하기 위해 사용 환경에 따라 다양한 형상이 사용 된다. 보강재로 사용되는 심금은 스프라켓(sprocket)에 고정되어 탈륜을 방지하고 동력을 전달해 주는 철심이다. 그리고 스틸 코드는 장비와 적재물의 중량을 고려하여 러버 트랙의 강도를 결정하는 역할을 한다.

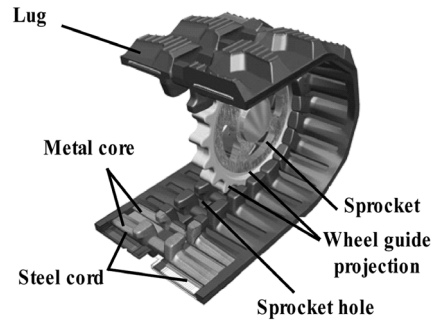


Fig. 1 Rubber track

2.2 유한요소 근사화

러버 트랙이 차지하고 있는 물질 영역을 Ω 로 나타내면, 운동 중인 러버 트랙의 현재 시점 t 에서의 비감쇠 동적변위 $u(x;t)$ 는 다음의 운동방정식

$$\sigma_{ij}(u)_{,j} + b_i = \rho \ddot{u}_i, \text{ in } \Omega \times (0, t^*] \quad (1)$$

과 초기 조건

$$u_i = u_i^0, \dot{u}_i = \dot{u}_i^0, \text{ at } t = 0 \quad (2)$$

그리고 경계 조건

$$u_i = \hat{u}_i, \text{ on } \partial\Omega_D \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} n_j = \hat{t}_i \text{ on } \partial\Omega_N \quad (4)$$

을 만족하여야 한다.²⁾ 여기서, t^* 는 시간응답 구간을 n_j 는 러버 트랙 표면에서의 단위 수직벡터를, $\partial\Omega_D$ 그리고 $\partial\Omega_N$ 는 변위경계 및 외부하중 \hat{t}_i 가 작용하는 하중경계 영역을 나타낸다. 그리고 σ_{ij} 는 코시 응력 텐서(cauchy stress tensor), b_i 는 체적력(body force), ρ 는 밀도(density)를 나타낸다.

위 운동 방정식에 가상일의 원리를 적용하고 감쇠 효과를 무시하면 다음과 같은 유한요소 지배 방정식을 구할 수 있다.

$$M \ddot{u}_n = P_n^{ext} - P_n^{int} \quad (5)$$

여기서, M 은 질량 행렬, P_n^{ext} 는 외력 벡터 그리고 P_n^{int} 은 내력 벡터이다.

러버 트랙의 시간 응답 해석에 있어 중동축 스프라켓의 부하에 의해 시간에 따라 각속도 변화와 원하지 않는 진동이 발생할 수 있다. 이 때 구동축 아

이들러(idler) 회전축을 기준으로 일정 회전 각도를 적용하고 러버 트랙의 이동 속도가 상대적으로 느리므로, 동적 문제가 아닌 준정적(quasi-static) 문제로 간주할 수 있다. 준정적 평형방정식에서는 관성항(inertia term)은 무시할 수 있으므로 식 (5)는 다음과 같이 표현될 수 있다.³⁾

$$P_n^{ext} = P_n^{int} \quad (6)$$

식 (6)을 시간에 대해 적분하면 최종 결과를 얻을 수 있다. 시간 적분 방법에는 일반적으로 명시적(explicit) 적분 방법과 암시적(implicit) 적분 방법이 있다. MSC/Marc에서는 접촉 알고리즘에 대해 계속적인 반복계산을 필요로 하므로 암시적 적분 방법을 적용하고 있다. 속도가 느린 문제에 대해 수치적 안정성과 정확성 면에서 암시적 적분법이 효율적인 것으로 암시적 적분법은 완전 뉴턴-랩슨(full Newton Raphson)법을 이용하여 다음과 같이 변위를 계산한다.^{4,5)}

$$K(u)\delta u = F - R(u) \quad (7)$$

여기서, u 는 절점 변위 벡터, F 는 외부 절점 하중 벡터, R 은 내부 절점 하중 벡터, K 는 접선 강성 행렬(tangent stiffness matrix)이다. 내부 절점 하중 벡터 R 은 내부 응력으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \sum_{elem} \int_V \beta^T \sigma dv \quad (8)$$

여기서, β 는 변위에 대한 미분 연산자(differential operator), σ 는 내부 응력(internal stress)이며 식 (7)은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$K(u_{n+1}^{i-1})\delta u = F - R(u_{n+1}^{i-1}) \quad (9)$$

여기서, i 는 반복 횟수(iteration number)를 나타내고, δu^i 는 i 번째 반복 계산에서 구해지는 변위 보정값(iterative displacement)이다. 따라서 다음 스텝의 근사해는 다음의 식 (10)과 (11)으로부터 구해진다.

$$\Delta u^i = \Delta u^{i-1} + \delta u^i \quad (10)$$

$$u_{n+1}^i = u_n + \Delta u^i \quad (11)$$

여기서, n 은 증분(increment), Δu^i 는 변위 증분(incremental displacement)이다.

3. 러버 트랙의 마모 예측 모델

러버 트랙의 마모는 이동할 때 러버 트랙 표면과 지면과의 접촉력(contact force)에 의한 마찰 슬립(frictional slip)에 영향을 받는다. 일반적으로 동일한 마찰계수에서 접촉 압력과 마찰력이 서로 비례하게 되어 균일한 마모를 보이는 것이 이상적이나, 고무 특성 및 지면과의 불균일한 접촉 등으로 일정하지 않은 슬립량(slip amount)을 발생시키게 된다. 결과적으로 불균일한 슬립과 마찰 에너지(frictional energy)는 러버 트랙의 편마모를 초래하는 원인이 된다.

따라서 고무 마모의 기본 원리나 그 메커니즘의 이해는 러버 트랙의 수명을 연장하는 데 필수적이다. 그러나 마모의 실질적인 중요성에도 불구하고 이에 대한 이해는 충분하지 않다. 그 주된 이유는 고무 마모는 마찰보다 더 복잡한 현상이고 고무 표면에서 발생하는 물리-화학적 결합으로 나타나는 현상이기 때문이다.

하지만, 많은 인자들 중에서 고무 마모는 마찰 에너지에 크게 영향을 받는다고 하여도 과언은 아니다. 고무의 마모와 마찰은 불가분의 관계에 있고 마찰이 있는 곳에 필수적으로 마모가 수반된다. 특히 마모 속도는 마찰 일에 크게 의존하는 것으로 여러 문헌과 실험을 통해 알려져 있다. 마찰 에너지와 마모량을 log-log scale로 도해하였을 경우 모든 고무 재료가 선형 관계를 나타낸다. 따라서 실험적으로 결정된 마모 속도와 마찰 일의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.⁶⁾

$$H_r(m/rev) = C[W_F(J/m^2)]^m \quad (12)$$

여기서, H_r 은 마모량, W_F 는 마찰 에너지, C 그리고 m 은 고무 재료의 고유한 상수를 나타낸다.

본 연구에서는 회전하는 러버 트랙에서의 마찰 에너지를 계산하여 러버 트랙의 마모율을 정량적으로 계산할 수 있는 수치기법을 도입하였다.

4. 수치 해석

4.1 해석 모델

고무 재료는 일반적으로 대변형 거동을 하고 초탄성체로 가정하는데 고무 재료 실험 데이터로부터

Table 1 Material properties of rubber track

Rubber track composites	Material Properties	Model
Rubber	$\mu_1 = 0.003, \alpha_1 = 0.001$ $\mu_2 = 1.4E-5, \alpha_2 = 0.822$ $\mu_3 = 0.864, \alpha_3 = 3.279$	Ogden's 3-terms
Metal core	$E = 210GPa, \nu = 0.3$	Isotropic
Steel cord	$E = 100GPa, \nu = 0.3$	

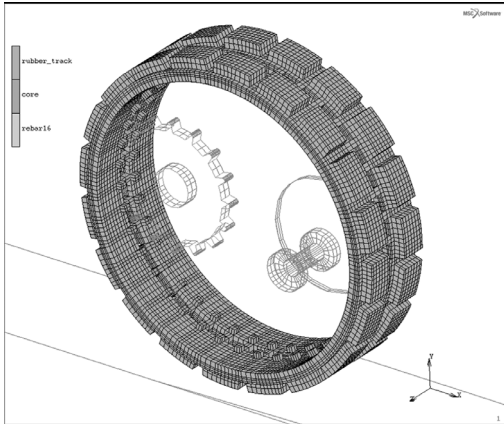


Fig. 2 FEM model of the rubber track

변형에너지(strain energy density) 함수인 Ogden 3차 모델을 적용하였다. 심금은 미소 변형을 일으키는 일반 탄성체로 가정하여 스틸 물성을 적용하였고 보강재로 적용되는 스틸 코드는 러버 트랙의 인장 특성을 부여하기 위하여 Marc에서 제공하는 rebar 물성을 사용하여 모델링 하였다. 본 연구에 사용된 물성치를 Table 1에 제시하였다.

해석 모델은 해석 대상의 실제 구조와 가까운 형상을 유지하면서 단순화시켰으며 러버 트랙의 유한 요소 모델은 지면과 접촉할 때 정확도 향상을 위해 8개 절점을 갖는 3D 솔리드 8면체 요소를 사용하였고 러버 트랙과 접촉하는 스프라켓, 아이들러, 롤러, 지면은 강체 모델로 가정하였다. Fig. 2에 완성된 러버 트랙의 3D 유한요소 모델을 나타내었다.

4.2 해석 조건

러버 트랙을 회전시키기 위해서는 총 3단계의 하중 경계조건이 입력되어야 한다. 첫 번째 단계는 러버 트랙의 장력을 부여하는 과정인데 Fig. 3과 같이 장비 중량(약 2,000kgf)의 약 50% 범위인 11,000N으

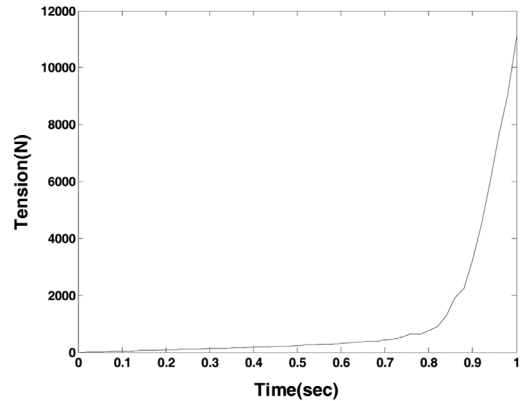


Fig. 3 Time variation of the initial tension

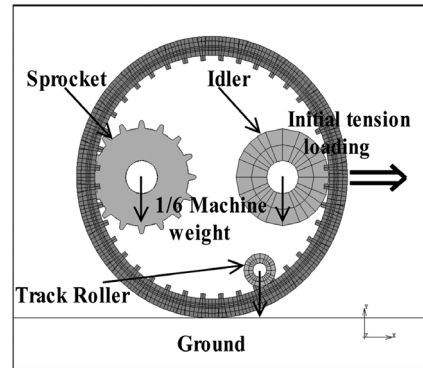


Fig. 4 Boundary conditions at the initial stage

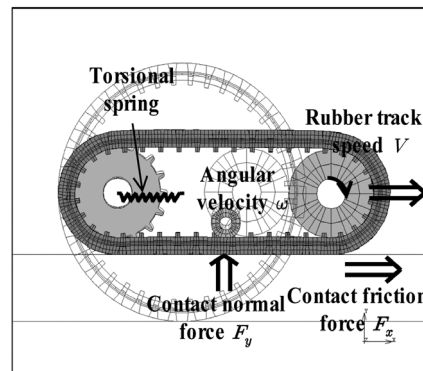


Fig. 5 Boundary conditions at the final stage

로 설정하였다. 두 번째 단계로는 장비 중량의 1/6 하중(3,333N)을 스프라켓, 아이들러, 트랙 롤러에 부여한다. 마지막 단계로서 러버 트랙을 회전시키기 위하여 아이들러 회전축에 일정한 회전 각속도(10rad/sec)를 적용하여 준정적(quasi-static) 회전을

구현하였고 러버 트랙이 회전하면 지면과의 마찰력에 의해 지면이 이동하도록 하여 러버 트랙이 회전하여 이동하는 효과를 주었다.⁷⁾ Fig. 4와 Fig. 5는 러버 트랙 해석 모델에서 적용된 경계조건을 나타낸다.

그리고 회전할 때 스프라켓에 연결된 유압모터의 부하를 구현하기 위하여 스프라켓 회전축에 스프링을 적용하고 강성 계수값 0.05kN-m/rad을 부여하였다. 지면과의 마찰계수는 0.3, 스프라켓, 아이들러, 트랙 롤러와의 마찰계수는 0.5를 기본적으로 적용하였으며 마찰 모델은 쿨롱(coulomb) 마찰 모델을 이용하였다.

4.3 해석 결과

본 연구에서는 일반적인 굴삭기 주행 속도 범위인 1.4m/s~2.46m/s에서 마찰 에너지를 평가하여 마모량을 예측해 보았다. 그리고 지면의 표면 거칠기에 따른 러버 트랙의 마모 영향을 알아보기 위해서 러버 트랙과 지면과의 마찰계수를 0.2~0.6사이의 범위로 설정하여 유한요소해석을 수행하였다.

러버 트랙과 관련한 공학적 해석은 기하학적 비선형 문제, 재료 비선형 문제, 경계 비선형 문제와 같은 비선형 문제들을 내포하고 있는데 본 연구에서는 이와 같은 문제들을 효율적으로 계산하기 위해 상용 비선형 유한요소해석 프로그램인 MSC/Marc를 사용하였다.

4.3.1 회전하는 러버 트랙 표면의 마찰 에너지

Fig. 6은 2.05m/s(10rad/s)의 일정한 속도로 주행할 때의 러버 트랙의 접지 압력 분포를 나타낸다. 러버 트랙은 트랙 롤러와 심금간 접촉으로 인한 진동을 줄이고 견인 성능을 향상시키기 위해 지면과 접지하는 러버 트랙 표면인 러그(lug) 패턴을 좌우 지그재그 형태로 설계하는데 러버 트랙이 일정 속도로 회전할 때 한쪽 러그를 기준에서 보면 아이들러가 지면과의 접점을 이루는 방향에서 접촉을 시작하여 스프라켓이 지면과의 접점을 이루는 방향까지 접촉을 한다.

따라서 임의의 시간에서 러버 트랙 표면이 지면과 접촉하는 동안의 마찰 에너지를 구하기 위해서는 접촉 시작 시점과 접촉 종료 시점을 알아야 할 필요가 있다. 접촉 시작 시점과 접촉 종료 시점을 알면

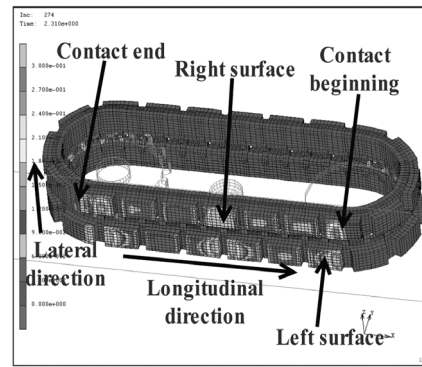


Fig. 6 Distribution of the contact normal stress

러버 트랙이 접촉하는 시간 동안에 계산된 마찰 에너지를 시간에 대해 적분하여 접촉하는 절점에서 발생하는 전체 마찰 에너지를 구할 수 있다. 접촉 시작 시점과 접촉 종료 시점은 러버 트랙 표면이 지면에 접촉하는 임의의 절점에서 하중이 작용하는 방향의 변위와 접촉 시간 관계로부터 알 수 있는데 여기서 하중 방향으로의 변위 변화가 없는 구간이 접촉 시점과 접촉 시간이며 이것으로부터 접촉 시간 동안의 필요한 데이터를 구하게 된다.

또한 마찰 에너지를 계산하기 위해서는 진행 방향의 마찰력(contact friction force), 슬립율(slip rate), 접촉 절점의 정보가 필요하다. 접촉 절점 정보는 임의의 시간에서 러버 트랙의 마찰 에너지 분포를 표현하기 위해 필요하다.

참고적으로 실제 굴삭기 같은 중장비는 직진 주행 운동 및 선회 운동, 브레이커 작업과 같은 일시적 충격력 조건을 고려해야 하지만 본 연구에서는 선회 운동과 같은 축방향 성분에 대해서는 논의하지 않기로 하며 직진 주행 회전 운동만을 고려하여 러버 트랙의 마찰 에너지와 마모량 데이터를 평가하기로 한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 러버 트랙 속도가 2.05m/s일 때 지면과 접촉하는 임의의 절점에서 계산된 접지 압력과 마찰 에너지율의 시간이력곡선이다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 보면 접지 압력과 마찰 에너지율의 시간이력곡선 분포가 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 접지 압력이 높으면 마찰 에너지율도 증가하게 된다. 그래프의 경향을 보면 우측 러버 트랙 표면과 좌측 러버 트랙 표면 모두 회전하

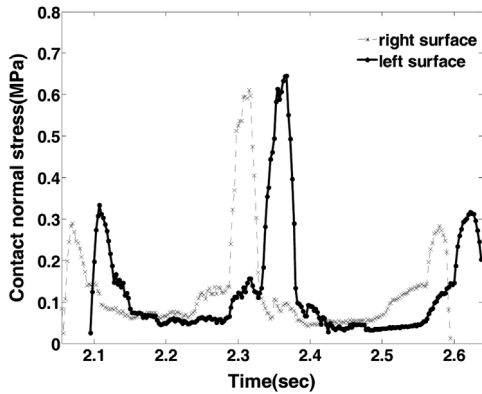


Fig. 7 Time history of the contact normal stress at the contact node

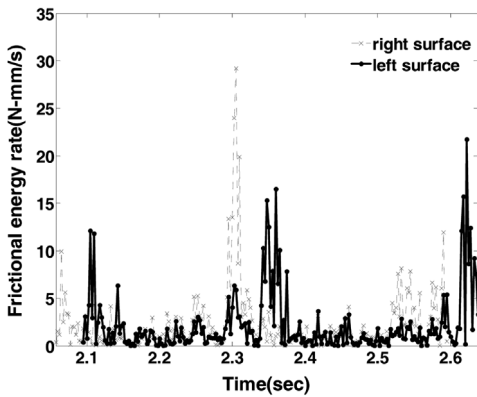


Fig. 8 Time history of the frictional energy rate at the contact node

는 방향에서 아이들러와 접촉이 시작될 때 접지 압력과 마찰 에너지율은 증가 후 감소하다가 트랙 롤러와 접촉하는 구간에서 다시 증가 후 감소한다.

마지막으로 스프라켓과 접촉하면서 마찰 에너지율은 급격하게 증가하다가 다시 감소하게 된다. 이러한 이유로 지면과 접촉하는 절점이 아이들러, 트랙 롤러, 스프라켓 하중으로 점착 현상을 보이다가 하중을 받는 영역을 지나가면 미끄러지는 현상을 보이기 때문이라고 판단된다.

Fig. 8은 단위 시간 당 마찰 에너지를 나타내기 때문에 마모량 계산에 직접 적용할 수가 없다. 따라서 마찰 에너지를 계산하기 위해서는 수치 적분을 수행하여야 한다. 즉, 접촉하는 시간 동안 식 (13)과 같이 적분하게 된다면 접촉하는 1개 절점에서 발생한 전체 마찰 에너지를 구할 수 있다.

$$E_{ij} = \int_{t_1}^{t_2} T_{x_{ij}} \cdot v_{x_{ij}} dt \quad (13)$$

여기서, $T_{x_{ij}}$ 는 러버 트랙 진행 방향의 마찰력이고 $v_{x_{ij}}$ 는 러버 트랙 진행 방향의 슬립율이다. 슬립율은 식 (14)와 같이 계산하였다.⁸⁾

$$v_{x_{ij}} = \frac{\omega R - V}{\omega R} \quad (14)$$

여기서, ω 는 아이들러 회전 각속도, R 은 아이들러 반지름, V 는 접촉 절점의 진행 방향 속도이다.

전체 마찰 에너지를 구하기 위한 수치 적분 방법으로는 수치 해석 프로그램인 Matlab의 사다리꼴 적분(trapezoidal numerical integral) 방법을 이용하였다. Table 2는 접촉 절점에서 계산된 전체 마찰 에너지 결과를 나타낸다.

Fig. 9와 Fig. 10은 러버 트랙이 2.05m/s의 일정 속도로 회전하는 동안 우측과 좌측 러버 트랙 접지면에서 발생한 전체 마찰 에너지 분포를 나타낸다. 결과는 좌측과 우측 각각 러버 트랙 표면의 8×10개의 절점에서 마찰 에너지를 3차원 그래프로 그리딩(griding)하여 나타내었다.

해석 결과를 보면 전체적으로 러버 트랙의 중심 부분에서 높은 마찰 에너지가 발생하는 것을 알 수 있는데 우측 러버 트랙 표면은 중심에서 후방 쪽으로 마찰 에너지가 높은 경향을 보이며 좌측 러버 트랙 표면은 중심에서 전방 쪽으로 마찰 에너지가 높은 경향을 보인다. 이러한 이유는 일정 속도로 회전하면서 지그재그 형태의 러버 트랙 표면 형상 때문

Table 2 Frictional energy result at the contact node

Node number	X-coordinate (mm)	Z-coordinate (mm)	Frictional energy (N-mm)
12318	615.21	-64.64	0.752588191
12320	602.57	-49.71	0.277534084
12324	590.50	-64.84	0.318053153
12325	590.36	-49.93	0.219208779
12327	602.68	-64.75	0.385865674
12328	590.14	-40.08	0.075091469
12342	590.53	-94.87	0.300042468
12345	12345	-79.85	0.349300028
⋮	⋮	⋮	⋮

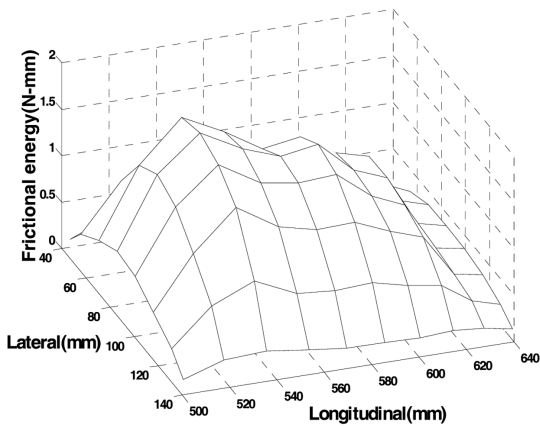


Fig. 9 Frictional energy distribution of right surface at 2.05m/s

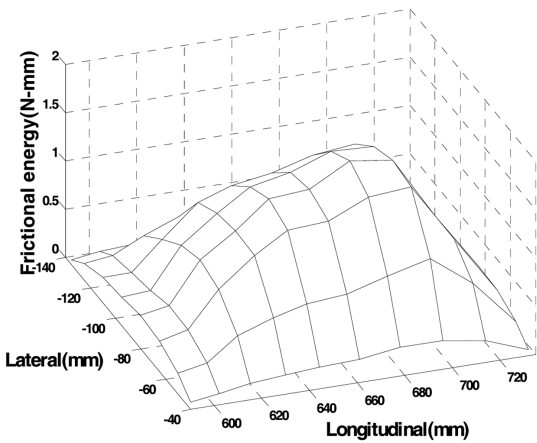


Fig. 10 Frictional energy distribution of left surface at 2.05m/s

에 하중을 받는 위치가 다르기 때문이라고 판단된다.

4.3.2 주행 속도 변화에 따른 러버 트랙 표면의 마찰 에너지

Fig. 11은 러버 트랙 주행 속도를 1.4m/s~2.46m/s로 다르게 했을 때 러버 트랙의 좌측 표면에 발생하는 마찰 에너지의 분포를 나타내고 있다. 그래프를 보면 전체적으로 중심에서 전방 쪽으로 높은 마찰 에너지가 분포되고 있으며 속도가 증가할수록 전체 마찰 에너지는 작아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 이유는 주행 속도가 빨라질수록 러버 트랙 표면이 지면에 접지하는 시간이 짧아지기 때문이라고 판단된다. 러버 트랙의 우측 표면 또한 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

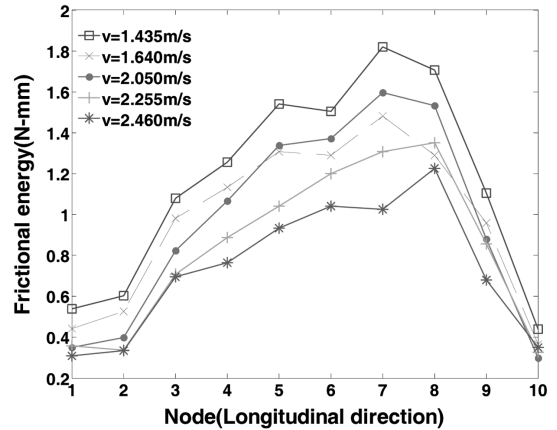


Fig. 11 Dependence of the frictional energy on the velocity

4.3.3 마찰계수 변화에 따른 Rubber Track 표면의 마찰 에너지 해석 결과

Fig. 12는 러버 트랙 표면과 지면 접지면의 마찰 계수를 다르게 했을 때 좌측 표면의 마찰 에너지 분포를 나타내고 있다. 전체적인 경향을 보면 주행 속도 변화와 마찬가지로 러버 트랙 표면의 중심에서 전방 쪽으로 높은 마찰 에너지 분포를 보이고 있으며 마찰계수가 증가할수록 마찰 에너지도 비례한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 러버 트랙이 거친 노면을 주행할 경우 마모량이 훨씬 높아질 것이라는 것을 예측할 수 있다.

Table 3에 주행 속도와 마찰계수를 다르게 했을 때 마찰 에너지 비교 결과를 정리하였다. 데이터는 접지하는 러버 트랙 표면의 각 절점에서 발생하는

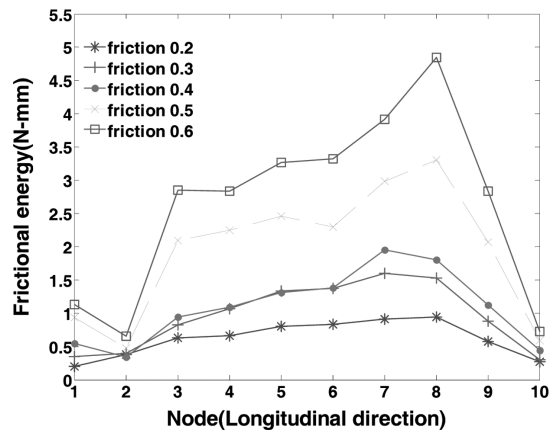


Fig. 12 Frictional energies for different friction coefficient

전체 마찰 에너지 값을 평균하여 비교하였다. 비교 결과 주행 속도 1.435m/s를 기준으로 보았을 때 최대 속도 2.460m/s까지 63%의 마찰 에너지가 감소하였다. 그리고 마찰계수 0.2를 기준으로 보았을 때 461%의 마찰 에너지가 증가하였다.

4.3.4 러버 트랙의 마모율 예측

고무 재료의 마모량 산출식인 식 (12)를 적용시키기 위해서는 실험처럼 접촉 압력이 접촉 표면에 균일하게 분포하는 경우이다. 하지만 실제 경우에는 접촉 압력과 슬립율이 불균일하게 작용하기 때문에 식 (12)는 바로 적용될 수 없고 다음의 수정된 마모량 산출식이 적합한 것으로 알려져 있다.

$$\dot{W}(m^3/rev) = 6C[\overline{E}_F(J/m^2)]^m \tag{15}$$

여기서, \dot{W} 는 접촉 면적 당 마모되는 총 체적, \overline{E}_F 는 1회전당 접촉 면적에 대한 평균 마찰 에너지이다. 그리고 Gent와 Pulford는 충진제가 함유된 타이어용 고무의 경우 C 와 m 을 각각 4×10^{-14} 와 1.4로 제시하였다. Table 3에 이 값을 이용하여 식 (15)가 적용되었을 때 주행 속도 및 마찰계수 변화에 따른 러버 트랙 표면의 마모량 예측 결과를 나타내었다. 결과를 보면 마찰 에너지와 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있었으며 주행 속도 1.435m/s 대비 최대 속도 2.460m/s에서 마모량은 약 41% 수준이었다. 또한 마찰계수가 0.2에서 0.6으로 변했을 경우 1800% 정도 마모량이 증가하였고 마모량의 증가는 주행 속도

보다는 지면과의 마찰계수가 더 많은 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

회전하는 러버 트랙이 지면과 접지할 때 접지면에서 발생하는 마찰 에너지의 변화를 유한요소해석 기법을 이용하여 구한 결과 다음의 주요 결과를 얻었다.

- 1) 유한요소해석 결과를 토대로 회전하는 러버 트랙 표면의 마모량을 예측하기 위한 수치기법을 제시하였다.
- 2) 굴삭기의 주행속도 범위, 지면과의 마찰계수 변화에 따른 해석을 수행하였다.
- 3) 일정 속도로 주행할 때 시간에 따른 마찰 에너지 분포는 높은 접지압이 발생할수록 증가하고 스프라켓, 트랙 롤러, 아이들러 하중에 영향을 받는 것을 알 수 있었다.
- 4) 러버 트랙 표면의 전체 마찰 에너지 분포를 보면 중심부를 기준으로 높은 마찰 에너지가 나타나고 좌측과 우측 표면의 경향이 다르다는 것을 알 수 있었다.
- 5) 러버 트랙의 마찰 에너지 및 마모량 예측 결과 주행속도가 증가할수록 마찰 에너지와 마모량은 감소하며 지면과의 마찰계수가 증가할수록 마찰 에너지와 마모량은 증가하였다.

결론적으로 위와 같은 결과가 신뢰성을 가지기 위해서는 실제 러버 트랙의 마모량 테스트에 의한 실험적 검증과 수치 해석 오차를 줄이기 위한 더 정확한 유한요소 모델과 해석 기법이 보완이 되어야 할 것이다. 하지만 마모량을 정량적으로 예측하는 것은 실제 러버 트랙 테스트 전에 러버 트랙을 설계하는 데 매우 유용하다고 생각되며 조금 더 신뢰성 있는 유한요소해석 결과가 확보된다면 실제 테스트에서 소요되는 시간과 비용을 많이 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

References

- 1) H. L. M. du Plessis and T. Yu, "Modelling the Traction of a Prototype Track Based on Soil-rubber Friction and Adhesion," Journal of

Table 3 Variation of the frictional energy and wear rate

Analysis condition		Wear rate (mm ³ /rev) × 10 ⁻¹⁸	Avg. frictional energy (N-mm)	Relative difference (%)
Velocity (m/s)	1.435	7.70	0.73	100
	1.640	5.65	0.62	85
	2.050	5.45	0.61	84
	2.225	4.14	0.53	72
	2.460	3.16	0.46	63
Friction coefficient	0.2	2.26	0.38	100
	0.3	5.45	0.61	160
	0.4	7.20	0.70	184
	0.5	22.90	1.29	339
	0.6	40.80	1.75	461

- Terramechanics, Vol.43, pp.487-504, 2006.
- 2) J. H. Choi, J. R. Cho, G. J. Kim and J. S. Woo, "Tire Wear Simulation Using Finite Element Method," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.79-84, 2005.
 - 3) S. C. Tang, "Quasi-static Analysis of Sheet Metal Forming Process-a Design Evaluation Tool," J. Mater. Process. Technol., Vol.45, pp.261-266, 1994.
 - 4) J. S. Sun, K. H. Lee and H. P. Lee, "Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods for Dynamic Problems," Journal of Material Processing Technology, Vol.105, pp.110-118, 2000.
 - 5) MSC Software, MSC.Marc User's Manual Version 2007r1, 2007.
 - 6) A. N. Gent and C. Pulford, "Mechanisms of Rubber Abrasion," J. Appl. Polym. Sci., Vol.28, pp.943-960, 1983.
 - 7) K. W. Kim, H. S. Jeong, J. R. Cho and Y. S. Yang, "Finite Element Analysis on Residual Aligning Torque and Frictional Energy of a Tire with Detailed Tread Blocks," Transactions of KSAE, Vol.12, No.4, pp.173-180, 2004.
 - 8) J. R. Cho, J. H. Choi, W. S. Yoo, G. J. Kim and J. S. Yoo, "Estimation of Dry Rod Braking Distance Considering Frictional Energy of Patterned Tires," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.42, pp.1248-1257, 2006.