

유한요소법을 이용한 궤도용 고무패드의 마모 예측 및 설계에 관한 연구

Design Study on the Wear Enhanced of Rubber Pad of Track Assembly with Finite Element Method

이 경 호*
Lee, Kyoung-Ho

노 근 래*
Roh, Keun-Lae

이 영 신**
Lee, Young-Sin

ABSTRACT

In this paper, we have proposed a wear-growth prediction method on the surface of rubber pad of track assembly installed in high-speed battle tank i.e. the automatic model updating code interfacing with commercial finite element simulation software. Also, simple and reasonable geometrical, material finite element model was established to be easily updated based on the empirical threshold value of contact pressure on the contact surface. From the iterative model update and analysis results, we discovered a weak point on rubber pad surface and suggested a new design concept for improving the wear performance of track assembly.

주요기술용어(주제어) : Finite Element(유한요소), Wear-Growth(마모 성장), Track Rubber Pad(궤도용 고무 패드), Contact Contour(접지형상)

1. 머리말

대부분의 고속기동용 전투차량은 높은 견인력과 우수한 지형 한계 극복 능력을 갖는 궤도형 차량으로 개발되어 왔다. 엔진, 변속기를 통해서 전달되는 구동력을 이용하여 무한히 회전하면서 휠이 구를 수 있는 완만한 노면을 제공해주는 일차적인 목적 이외에, 궤도는 고무패드를 갖고 있어서, 노면으로부터의 충격

을 흡수하여 차체와 서스펜션을 보호하고 포장도로의 손상을 방지하는 역할을 수행한다.

고속 전투용 야지 기동 차량은 임무 특성상, 포장로 보다는 비포장로 또는 야지에서의 기동이 전체의 70~80%의 배분율을 차지할 정도로 많을 수 밖에 없으며, 특히 노면 요철에 의한 충격과 비포장로에서의 가감속 및 조향은 궤도에 장착된 고무패드에 뜯겨짐(천킹)과 같은 비정상 마모를 유발하게 된다. 포장로에서 등속으로 직진 주행하면 궤도 패드가 균일하게 마모되지만, 야지 또는 암석 지형을 주행할 경우, 비정상적인 마모가 발생하여 패드의 수명을 급격히 감소시킨다. 그림 1은 비포장로 위주로 450여 km 주행 후 궤도 패드에 천킹을 포함한 비정상 마모가 발생한

† 2008년 8월 19일 접수~2008년 10월 10일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University)

주저자 이메일 : doroti@korca.com

예로써, 고무패드의 가장자리 부분이 심하게 마모됨을 알 수 있다.

마모, 발열 등의 요구성능을 적절히 충족하도록, 천연고무(NR)와 합성고무(SBR) 및 첨가제 배합 비율을 결정하는데, 일반적으로 합성고무의 양이 증가할수록 경도는 증가하나 인성이 감소하여 천킹에 불리해진다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 고속 기동 차량의 궤도용 패드 고무의 마모 성장(Wear-growth) 예측 기법을 수립하고, 마모 최초 발생 영역의 고무 인성을 증대시켜 내마모성을 개선시킨 궤도 패드 신설계안을 제시하였다.



[그림 1] 궤도 패드의 마모 형태

2. 궤도용 고무패드의 유한요소 모델링

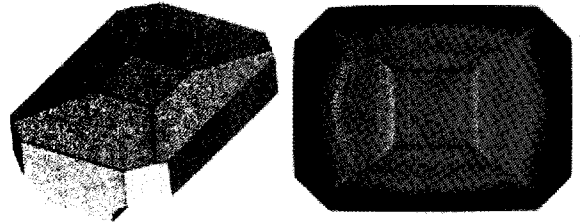
가. 기하학적 모델링

고무패드의 마모 성장 예측을 위해서는 반복적인 유한요소 모델 갱신과 해석 과정을 필요로 한다. 따라서, 모델 갱신이 용이하고, 모델 수정시에도 계산상의 수렴 문제없이 해석이 수행되고, 해석 시간이 오래 걸리지 않도록 모델을 단순화할 필요가 있다.

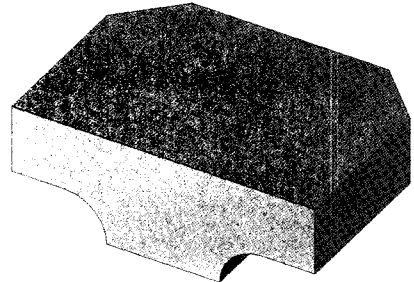
궤도 패드와 동일하게 돌출부를 갖는 모델을 유한요소 해석한 결과 그림 2와 같이, 돌출부에 접촉압력이 집중되었다. 즉, 패드는 돌출 부위가 조기에 마모됨으로써 조기에 편평한 면을 갖는 형상이 될 것으로 예측되었다. 실제 시험에서 약 20~30km의 궤도 길들이기 주행 후에 패드의 돌출된 부위가 편평하게 마모되었다.

따라서, 그림 3과 같이 편평한 형상을 궤도 패드의 마모 초기 상태 모델로 설정하여 기하학적으로 단순화하였다. 그 결과, 비교적 균일한 크기를 갖는 육면체 요소를 생성할 수 있었으며, 해의 수렴성을 개선하고, 계산 시간을 단축시킬 수 있었다. 또한, 해석시 차량의 수직하중과 궤도 진행방향에 대한 마찰력만을

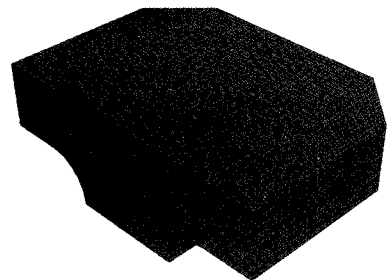
고려하고, 횡하중 조건을 무시함으로써, 좌우 대칭 경계조건을 부여하고, 대칭축에 대한 절반만을 모델링(Half-modeling)하여 해석 시간을 추가로 단축시켰다.



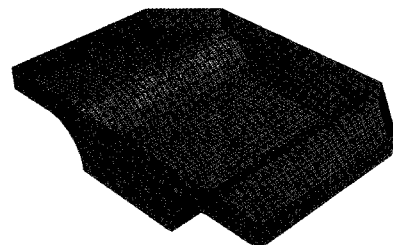
[그림 2] 초기상태 궤도패드의 접촉압력 분포



[그림 3] 궤도 패드의 형상 단순화



(a) 패드고무 모델링



(b) 패드 플레이트 모델링

[그림 4] 궤도 패드의 유한요소 격자 생성

유한요소 모델링 방법 중, Free mesh는 내부적인 생성 알고리즘에 따라서 생성되는 방법으로써, 유한요소 모델링이 쉬운 반면에, 생성된 유한요소의 형상을 원하는 형태로 제어하기가 용이하지 않다. 본 연구에서는 그림 4와 같이 웨드 패드를 구성하는 패드 고무와 패드 플레이트를 mapped mesh로 모델링함으로써, 해의 정확도를 향상시키고 모델 수정이 용이하도록 하였다. 본 연구에서는 노면과 패드고무 간의 경계면에서의 접촉에 해석의 중점을 두었으므로, 해석의 수렴성 개선을 위하여, 응력계산이 불필요한 패드고무와 패드 플레이트의 경계면을 접촉 구속(Tied Contact)시키지 않고, 동일 절점을 공유하는 형태로 모델링하였다.

나. 고무 재료 모델링

고무는 금속재료와 달리, 초탄성(Hyper-elasticity), 점탄성(Visco-elasticity)에 의한 완충 효과 등과 같은 독특한 성질을 갖는다. 고무의 변형은 비선형, 비압축성, 대변형의 특성이 있고, 그 변형 양상도 고무의 화학 조성에 따라 큰 차이를 보인다. 이러한 고무의 거동을 특성화하기 위해서 변형에너지 밀도(Strain Energy Density)의 주변형률 불변량(Principal Strain Invariant, I_1, I_2, I_3) 또는 주연신률(Principal Stretch Ratio, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)에 대한 함수 형태의 구성방정식이 제안되었다^[2].

유한요소 해석에서 널리 사용되고 있는 고무의 구성방정식은 식 (1)의 형태로 Mooney 및 Rivlin에 의해 제안되었다. 고무가 등방성(Isotropic)이고, 비압축성(Incompressible)일 때, $I_3=1$ 이므로, 식 (1)은 식 (2)와 같이 간략화 된다.

$$U = \sum_{i,j,k=0}^{\infty} A_{i,j,k} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (1)$$

$$U = \sum_{i,j=0}^{\infty} A_{i,j} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (2)$$

식 (2)의 멱급수 형태에서 1차항만을 고려하여, 식 (3)의 Neo-Hookean 모델과 식 (4)의 Mooney-Rivlin 모델이 제시되었다.

$$U = A_{10}(I_1 - 3) \quad (3)$$

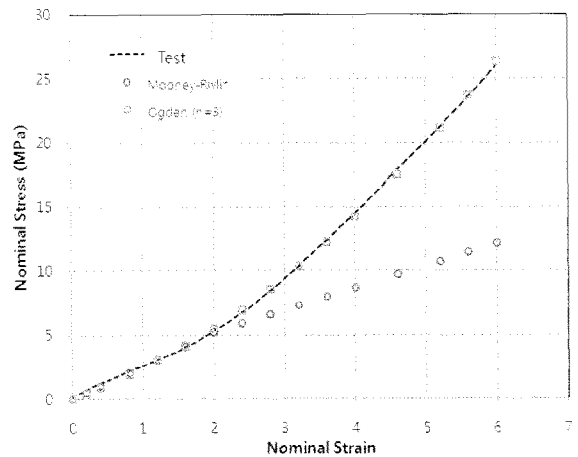
$$U = A_{10}(I_1 - 3) + A_{01}(I_2 - 3) \quad (4)$$

여기서, 재료상수 A_{10} 과 A_{01} 은 인장시험 데이터의 곡선회귀(Curve-fitting)를 통해서 계산된다. 일반적으로 Mooney-Rivlin 모델은 2 이하의 변형률(Strain) 구간에서는 실험 데이터를 잘 설명하지만, 그 이상에서는 적용이 곤란한 단점이 있다.

큰 변형률 구간에서는 주변형률 불변량 I_1, I_2 자체가 어떤 물리적 의미를 갖지 않기 때문에 이 양들로 이루어진 변형에너지 함수도 물리적 의미를 부여하기 어렵다. 대안으로써, Ogden은 변형에너지 함수를 주변형률 불변량의 함수가 아닌 주연신을 자체의 함수 형태인 식 (5)를 제시하였다. 여기서, μ_i 와 a_i 는 Ogden 재료상수이며, λ_j 는 주연신율이다.

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{a_i} (\lambda_1^{a_i} + \lambda_2^{a_i} + \lambda_3^{a_i} - 3) \quad (5)$$

고무패드에 적용된 고무재료에 대한 일축인장 시험에서, 축방향의 응력과 변형률을 얻었다. 시험 데이터를 곡선회귀하여 Mooney 및 Ogden 재료상수를 각각 구한 결과, $A_{10}=0.86, A_{01}=0(\text{MPa}), a_1=2.71, a_2=1.98, a_3=2.79, \mu_1=0.67, \mu_2=-0.39, \mu_3=0.32$ 이었으며,



[그림 5] 패드용 고무시험편의 재료특성치 모델

그림 5와 같이 Ogden 모델이 웨도용 패드고무의 특성을 잘 대변하였다.

돌출부가 편평화되기 전의 최초상태의 패드모델에 대해서 고무의 탄성계수를 임의로 5MPa의 선형으로 가정하여 해석한 결과, 최대 주변형률은 0.21 이하로써 상당히 낮은 값을 나타내었다. 변형이 크게 발생하지 못한 이유는 비압축성의 고무가 수직방향의 압축하중에 대하여 평면방향으로 팽창되어야 하나, 패드 플레이트에 의해서 면내의 변형이 구속되었기 때문이다. 따라서, 본 모델에 대한 해석은 대변형 조건에 해당되지 않으므로, 고무의 탄성계수를 5.0MPa의 선형으로 가정하여 해석을 수행하였다.

다. 웨도 작용하중 설정

평탄로에서 아직까지 임의의 지형 조건에 대하여 웨도패드의 마모 성장 패턴을 예측한다는 것은 현실적으로 구현하기 어려우므로, 본 연구에서는 평탄로에서 정속 및 가감속 주행시 웨도에 전달되는 하중조건을 적용하여 패드 고무의 마모 성장 예측 기법을 도출하였다.

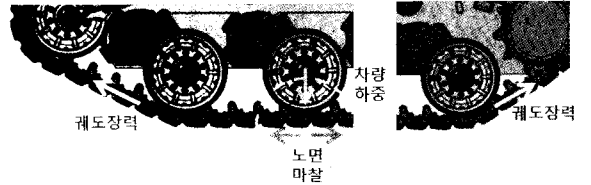
그림 6과 같은 차량하중, 동력장치 구동력, 노면 조건이 웨도에 다음과 같은 형태의 외력으로 작용한다.

- 웨도장력(Tension) : 동력장치의 구동력과 웨도장력 조절기로부터 발생한 인장하중이 웨도몸체 및 핀, 핀부싱, 선단연결기, 중앙가이드에 작용
- 토크(Torque) : 무한웨도의 정해진 구간 반복이송에 따라, 핀 및 핀부싱에 토크 작용
- 수직하중 : 차량하중이 로드휠을 통해서 수직하중으로 웨도몸체에 작용
- 노면마찰 및 전단력 : 가감속 및 그림 7에서와 같은 조향/선회시 패드와 노면과의 접촉면에서 상대속도가 발생하여 미끄럼(Slip) 마찰에 의한 마찰력 또는 전단력이 패드 및 웨도몸체에 작용

웨도에 작용하는 하중조건 가운데 패드의 마모에 직접적인 영향을 미치는 인자는 수직하중과 노면마찰로써, 그림 8에 도시한 바와 같다.

단순화된 웨도 패드 고무 및 플레이트의 유한요소 모델에 웨도 작용하중을 그림 9와 같이 경계조건으로 구현하였다. 여기서, x 는 웨도의 진행방향(종방향)을, y 는 횡방향을, z 는 수직방향을 의미한다. 또한, u , v ,

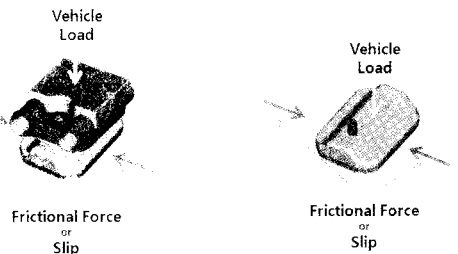
w 는 각 방향의 변위 성분을 의미한다. 평지의 등속 직진 주행조건을 정상상태를 구현하기 위해서, 우선 웨도 패드와 노면과 접촉된 상태에서 접촉면에 1.25 ton의 수직하중을 부과하였다. 또한, 수직하중이 부과된 상태에서, 가속 및 감속시 또는 좌/우 조향시 발



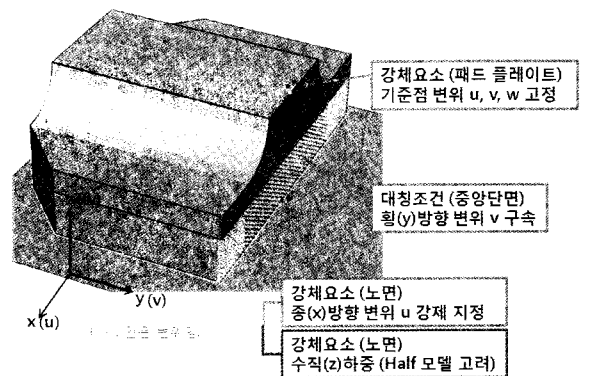
[그림 6] 웨도에 작용하는 외력



[그림 7] 웨도 차량의 주행 조건



[그림 8] 웨도 패드에 작용하는 외력



[그림 9] 변위 및 하중 경계조건 설정

생하는 패드와 노면의 미끄러짐(Slip)을 구현하기 위해서, ±5mm의 종방향 강제변위(u)를 부여하였다. 여기서, +는 가속 조건을, -는 감속 조건을 의미한다.

3. 마모의 모델링 구현 및 해석절차

마모는 물체 표면의 재료가 점진적으로 손실 혹은 제거되는 현상으로써, 두 미끄럼 접촉면에서의 마모량을 예측하기 위해서 식 (7)과 같은 형태의 이산화된 식이 사용된다.

$$\dot{w} = K \frac{pv}{H} \quad (6)$$

여기서,

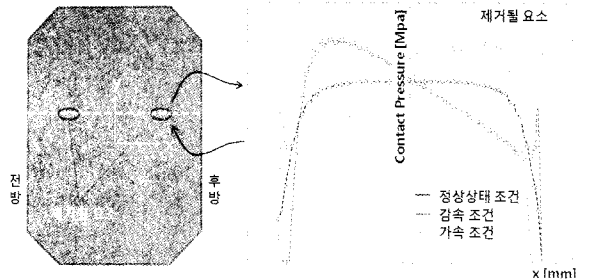
- \dot{w} : 요소의 마모 체적 변화량
- K : 마모 계수
- H : 재료의 경도
- p : 접촉면의 압력
- v : 접촉면의 상대속도

기존의 연구^[5]에서 유한요소 해석을 통해서 계산된 접촉압력과 접촉면의 상대속도를 식 (6)에 대입함으로써, 요소의 절점의 위치를 수정하는 방법으로 마모를 예측하는 기법이 개발되었다^[5]. 본 연구에서는 해석절차를 단순화하고자, 정적 유한요소 해석에서 계산된 절점의 접촉압력 만을 이용하여, 그림 10과 같이, 임계치 이상으로 높은 접촉압력을 나타내는 부위의 요소를 제거하는 방법으로 마모의 성장 패턴을 예측하였다.

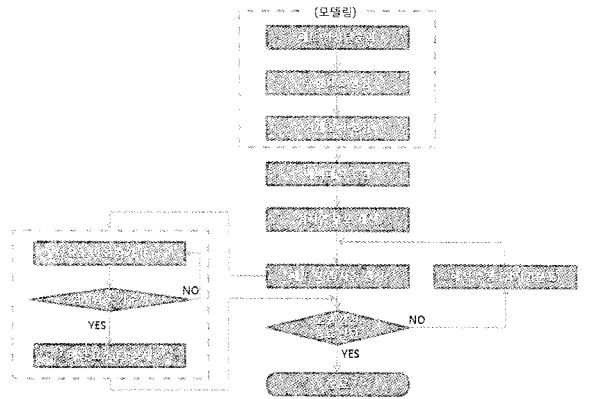
특정 y 지점에 대해서 x방향으로 절점에 대한 접촉압력을 정상상태, 감속, 가속 조건에 대하여 구하고, 임의로 설정한 임계값 10MPa을 초과한 절점에 대해서는 해당 요소를 제거하는 방식으로 마모의 성장을 유한요소 모델에 반영하였다. 접촉압력에 대한 임의의 기준치인 10MPa은 수차레의 시행착오를 통해서 도출되었으며, 물리적인 의미를 갖고 있지는 않다. 이 값이 너무 작으면, 삭제되는 유한요소의 영역이 너무 넓어서 마모의 성장 과정을 확인할 수 없으며, 너무

크면 마모가 더디게 성장하거나 진행되지 않는 결과를 얻었다. 임계치(Threshold) 설정에 따라 마모의 성장 패턴이 다소 변화하였으나 큰 차이를 보이지는 않았다.

본 연구에서는 상용 유한요소 해석 코드인 ABAQUS와 연동하여^[7], 접촉압력의 임계값을 초과하는 절점과 유한요소의 ID를 추출하는 python 스크립트를 작성함으로써, 모델 수정을 용이하게 하였다.



[그림 10] 접촉압력을 이용한 모델 갱신 개념



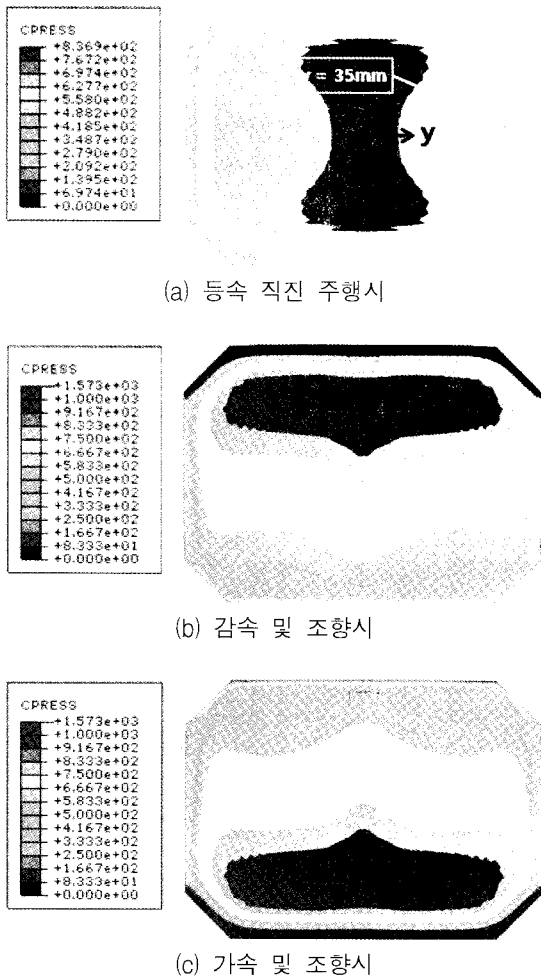
[그림 11] 웨도 패드 마모 성장 예측 플로차트

본 연구에서 제시하는 웨도용 패드고무에 대한 마모 패턴 예측 절차를 요약하면 그림 11과 같다. 웨도 패드를 3차원으로 유한요소 모델링한 후, 예비 응력 해석(Preliminary Analysis)을 통해서 형상을 단순화한 후, 고무의 물성 및 경계조건을 구현하여 반복적인 응력해석-모델 갱신을 통해서 마모 성장을 예측하는 것이다. 패드에 대한 응력해석-마모 성장 모델링 과정은, 생성된 모델에 대하여 차량의 등속주행, 가속 및 감속 조건을 고려하여 수직하중과 노면에 강제적

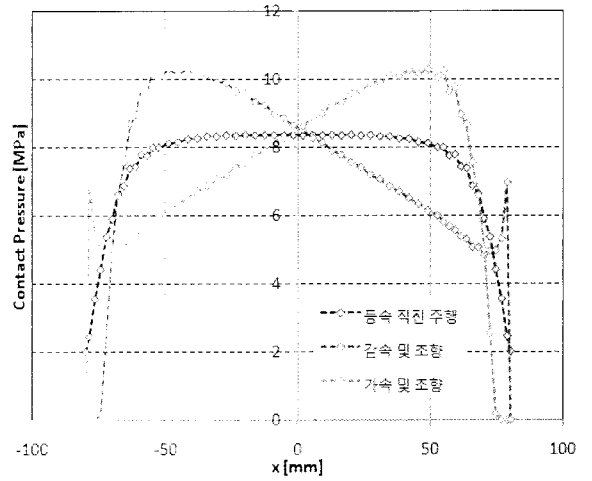
인 slip 변위를 부여하여 해석을 수행한 후, 접촉압력이 임계치(10MPa) 이상인 절점을 포함하는 요소를 탈락시키는 절차를 반복하는 사이클로 구성된다.

4. 접촉압력 해석을 통한 초기 마모 예측

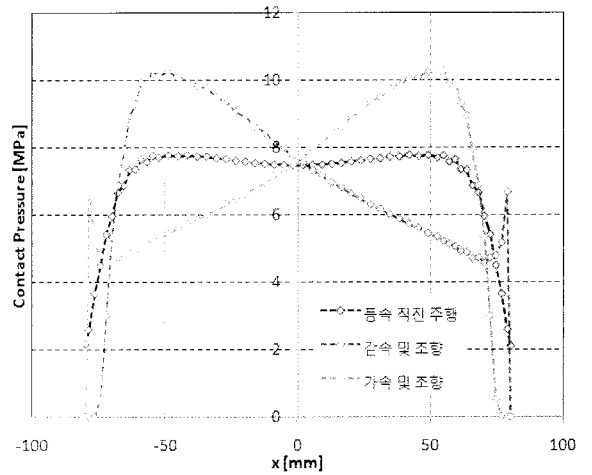
궤도의 등속 직진, 가감속 및 조향 조건에 대한 마모 초기상태의 패드 모델의 노면에 대한 접촉 응력 해석을 통해서, 그림 12와 같이, 각 주행 조건별 패드 표면의 접촉압력 분포를 얻었다.



[그림 12] 주행조건별 궤도 패드 표면의 접촉압력 분포



(a) 패드 중앙부(y=0)에서의 접촉압력 분포



(b) y=35mm 지점에서의 접촉압력 분포

[그림 13] 주행조건별 궤도패드 표면의 접촉압력 변화

초기의 편평한 패드 모델에 대한 해석 결과, 패드 고무 표면의 중앙부(y=0)와 y=35mm 위치에서 각 주행 조건별 접촉압력은 그림 13과 같이 변화하였다. 등속 직진 주행시 10MPa의 임계치를 초과하는 접촉압력이 발생하지 않았으나, 가감속을 고려한 노면의 ±5mm 종방향 강제변위가 부가됨으로써, 감속시는 전방, 가속시는 후방에 접촉압력이 크게 증가하여 임계치를 초과하는 영역이 나타났다. 이 부위의 유한요소하여 1차 모델 수정한 결과 그림 14와 같다. 모델 갱

신을 통해서, 패드 중심에서 종방향으로 약 1/3~2/3에 해당하는 영역과 전후방의 에지부에서 마모가 최초 발생하는 것을 알 수 있었다.



[그림 14] 웨도패드 모델 1차 수정 결과

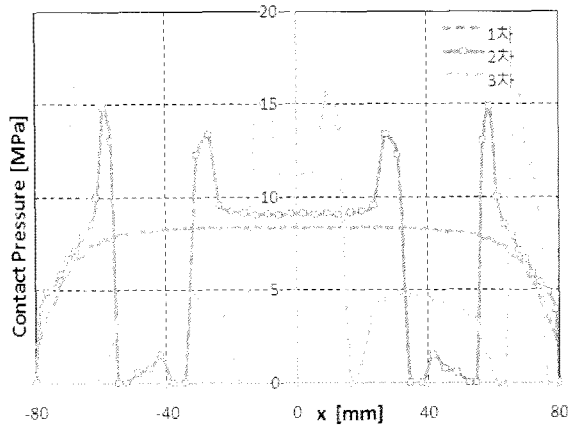
5. 마모 성장 예측 및 내마모 설계안 도출

앞 절에서는 마모가 미발생한 초기 상태의 패드 모델에 대하여 접촉압력 분포가 각 주행조건별로 어떻게 달라지며, 그로부터 마모가 시작되는 위치 예측 결과를 보여주었다. 이번 절에서는 패드의 마모량이 증가함에 따른 패드 표면에서의 접촉압력 분포 변화 양상과 그에 따라 마모가 어떻게 성장하는지를 보이고자 한다.

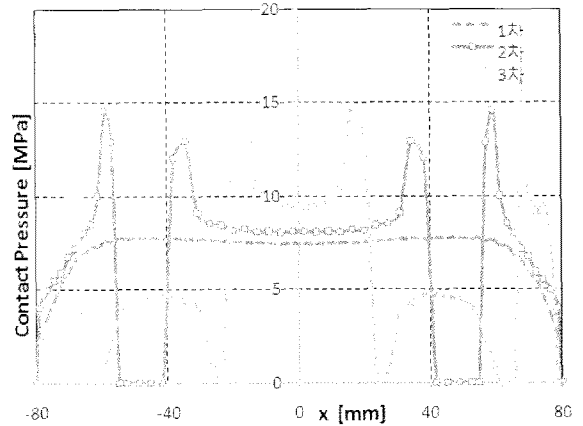
마모량 증가에 따라 패드 중앙부($y=0$)와 $y=35\text{mm}$ 위치에서 등속 직진 조건에서의 접촉압력 변화는 그림 15, 가감속 및 조향시 접촉압력 변화는 그림 16과 같이 나타났다. 그림에서 1차는 초기 패드 상태를, 2차는 마모 개시된 상태를, 3차는 마모가 성장한 상태를 각각 의미한다.

그림 17은 마모가 성장함에 따라 접지압 분포와 모델이 자동 갱신되어 마모형상이 변화하는 양상을 보여주고 있다. 마모(또는 천칭)량이 증가할수록, 노면과의 접촉면적이 감소하는 만큼 접촉압력이 증대된다. 또한, 뜯겨져 나간 영역의 에지부에 가감속 및 조향시 Slip 변위가 부가될 때, 응력이 집중되면서 이 부위의 고무 마모량이 집중적으로 증대된다.

또한, 2차까지 모델 수정되어 해석된 비교적 마모량이 작은 경우는 뜯겨진 내측의 영역(패드 중앙부에서는 $34 < |x| < 54$ 에 해당함)에서 노면과 접촉이 거의 없지만, 3차와 같이 마모가 다소 성장한 상태에서는



(a) 패드 중앙부

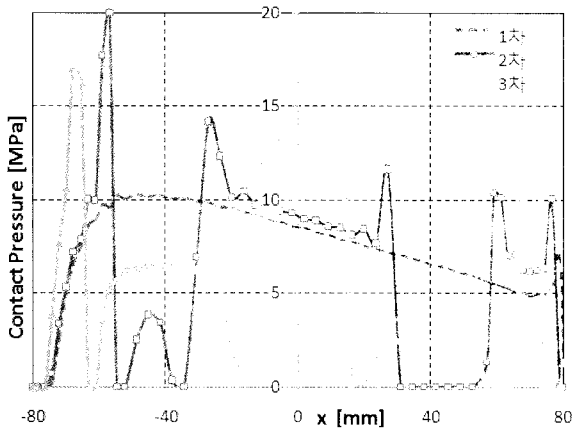


(b) $y=35\text{mm}$ 위치

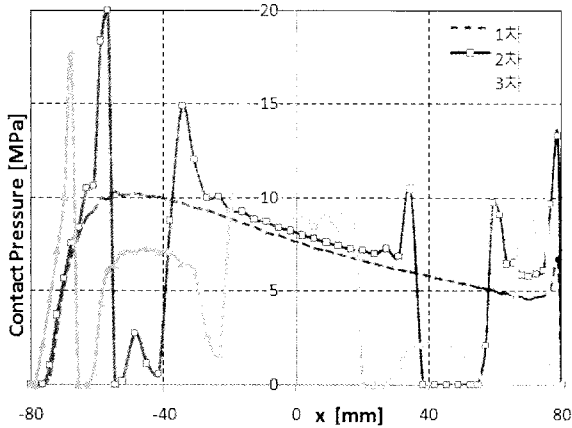
[그림 15] 등속 직진시 마모량 증가에 따른 접지압 변화

이 부분에도 노면과의 접촉이 일어나서, 최초 마모 발생 영역의 골이 점점 깊게 패이게 될 것이라는 예측이 가능하다.

이상과 같은 마모 예측 결과, 패드의 내마모성 향상을 위해서, 패드에서 마모가 최초 발생하는 영역에 그림 18과 같이, 경도(Hardness)는 동일하되 인성(Toughness)이 높은 고무를 배치함으로써, 내천칭성을 증대시키는 설계안을 제시한다. 부분적으로 이종의 고무재료를 적용하기 위한 기술로서, 이중 사출성형으로 패드를 제작하거나, 제조 후에 국부적으로 방사선을 조사하는 방법이 알려져 있다.

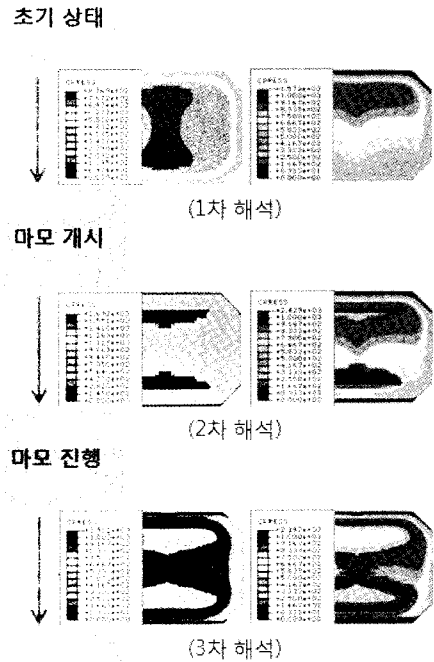


(a) 패드 중앙부

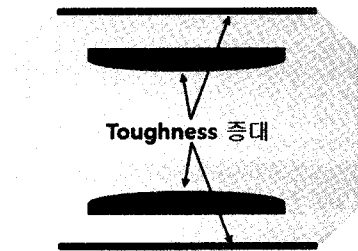


(b) y=35mm 위치

[그림 16] 감속, 조향시 마모량 증가에 따른 접지압 변화



[그림 17] 마모량 증가에 따른 접촉압력 분포 변화



[그림 18] 패드고무 내마모성 개선 설계 방안

6. 맺음말

궤도용 패드 고무의 마모 현상을 유한요소 해석 기법을 이용하여 예측하고자 한 본 연구를 통해서 다음의 결론을 도출하였다.

첫째, 고속 기동용 궤도차량의 복잡 다양한 주행조건으로부터 패드의 마모에 영향을 미칠 외부 조건을 추출하여 정량화하였다. 불규칙한 노면을 정량화하여 모사하는 것은 어려웠으므로, 평지에서 정속, 가감속 및 조향 조건만을 정량화하여 궤도 패드의 유한요소

모델에 경계조건으로 반영하여 해석절차를 수립하였다.

둘째, 노면과 미끄럼 접촉하는 패드 표면에서의 접촉압력 분포 계산 결과로부터, 접촉압력이 시행착오 (Trial-and-error) 방법으로 얻은 임계치 10MPa을 초과한 요소를 제거하여 패드의 마모를 모델 자동 갱신(Automatic Model Update)에 반영하는 해석 및 마모 성장 모사(Simulation) 기법을 구현하였다.

셋째, 패드의 마모 시작 위치와 진행 패턴을 분석한 결과, 패드 중심부로부터 종방향으로 1/3~2/3 위

치 및 전후방 애지부에서 시작하여 점차 영역이 확대되는 방향으로 마모가 성장하였다.

이상의 결과를 토대로 마모가 최초 발생하는 영역의 고무 인성을 증대시킴으로써, 내마모성을 개선시킨 웨도 패드 설계안을 도출하였다.

참 고 문 헌

- [1] 이경호 외, “웨도형 전투차량의 웨도박리 발생 및 성장모드 예측에 관한 연구”, 한국군사과학기술학회지, Vol. 10, No. 3, pp. 173~180, 2007.
- [2] 이형일 외, “초탄성고무 물성평가용 미소압입시험기의 소프트웨어 및 하드웨어 개발”, 대한기계학회논문집 A권, Vol. 28, No. 6, pp. 816~825, 2004.
- [3] 류한식 외, “웨도시스템의 웨도링크와 연약지반과의 상호 접촉연구”, 대한기계학회논문집 A권, Vol. 28, No. 11, pp. 1711~1718, 2004.
- [4] 이병훈 외, “고속 웨도차량의 동역학적 모델링 및 해석”, 대한기계학회논문집 A권, Vol. 30, No. 11, pp. 1486~1493, 2006.
- [5] 강병석 외, “롤포밍 공정에서의 롤 마모에 관한 연구”, 대한기계학회논문집 A권, Vol. 27, No. 11, pp. 1881~1888, 2003.
- [6] 배준우 외, “부분구조법을 이용한 2차원 프레팅 마모 해석”, 대한기계학회논문집 A권, Vol. 31, No. 7, pp. 784~791, 2007.
- [7] Hibit, Karlsson and Sorensen, “Contact in ABAQUS/Standard”, ABAQUS Inc., 2006.
- [8] K. J. Bathe, “Finite Element Procedures in Engineering Analysis”, Prentice-Hall Inc., 1982.