

궤도형 전투차량의 궤도박리 발생 및 성장모드 예측에 관한 연구

Separation Mode Analysis of Track Assembly of Main Battle Tank

이 경 호* **박 병 훈***
Lee, Kyoung-Ho Park, Byoung-Hoon

ABSTRACT

In this paper, we have proposed a simple finite element model for separation mode analysis on the roadwheel and track assembly of main battle tank and established a contact stress-based mechanism which could explain the initiation and growth of separation defect occurred during the test of pad-replacable track. It was proved that the longitudinal contact shear stress component on the pin hole region of the track shoe body which is parallel to the driving direction is consistent with the crack initiation at the bonding surface between track shoe and wheel-side rubber. The longitudinal shear stress increased locally near the separated region after the separation initiated. So we could assume that the local stress concentration accelerates the separation growth according to the shear mode.

주요기술용어(주제어) : Main Battle Tank(전차), Track(궤도), 박리(Separation), Finite element(유한요소), Contact (접촉), Durability(내구성)

1. 서론

차륜형 전투차량의 단점인 야지 기동의 한계점을 극복하기 위해서 많은 전차, 장갑차 등이 궤도형 차량으로 개발되어 왔다. 궤도는 노면과의 접지력을 유지하면서, 노면의 굴곡에 상관없이 휠의 기동을 가능하게 해주며, 고무 층에서 노면의 충격을 일차적으로 흡수하여 서스펜션과 차체로의 진동 전달을 억제해주는 기능을 담당한다.

궤도 차량의 단점은, 전체 중량의 15% 이상을 차지하는 현수장치(서스펜션, 휠, 궤도조립체 등)와 고출력의 엔진의 중량 증가로 인한 동력 손실에 있다. 궤도 1조의 무게를 1kg 감소시킴으로써, 0.2ton 이상의 전차 중량 감소, 연비 개선 효과를 얻을 수 있으며, 최근 궤도에 대한 경량화 필요성은 증대되는 추세이다.

그러나, 궤도의 중량 절감은 자칫 내구성 저하로 이어질 우려가 있다. 임무 수행중에 1~2개의 궤도라도 파손되어 일시적이라도 기동력을 상실한다면, 적 위협에 대한 회피가 불가하므로, 궤도 개발시 내구/신뢰도 확보가 무엇보다 우선시된다.

일체형 궤도의 단점인 짧은 교체주기(수명)를 보완

† 2007년 4월 19일 접수~2007년 6월 15일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : doroti@add.re.kr

하기 위해서 최근 패드분리형(교환형) 궤도로 대체되는 추세이다. 몸체고무(wheel side rubber), 패드 등의 궤도 구성품은 마모성 품목으로서, 일정 마모 수명주기가 되면 궤도슈우로부터 분리해 내고, 새롭게 몰딩하게 되는데, 거친 노면과 직접 닿는 패드는 비교적 마모가 빨리 일어난다. 일체형 궤도는 패드와 궤도슈우(궤도몸체)가 일체형으로서, 패드를 다시 몰딩하기 위해서, 궤도를 탈거해야 하는 반면에, 패드분리형 궤도는 패드를 궤도슈우로부터 분리하기가 용이하여, 유지비가 적게 들고, 야전에서의 운용성 측면에서도 많은 이점이 있다. 패드교환형 궤도는 일반적으로 그림 1과 같은 형상이다.

궤도조립체를 구성하는 궤도슈우(궤도몸체), 패드, 몸체고무, 핀 등은 차체와 노면을 통해서 전달되는 복합적인 하중 조건에 지속적으로 노출된다. 궤도와 궤도를 연결하는 핀은 장력과 비틀림 하중을 받게 된다. 고무 재질로 된 패드는 노면의 다양한 형상으로부터 충격과 마찰력을 받는다. 궤도슈우는 핀을 통해서 전달되는 궤도 장력과 몸체고무를 통해서 차체로

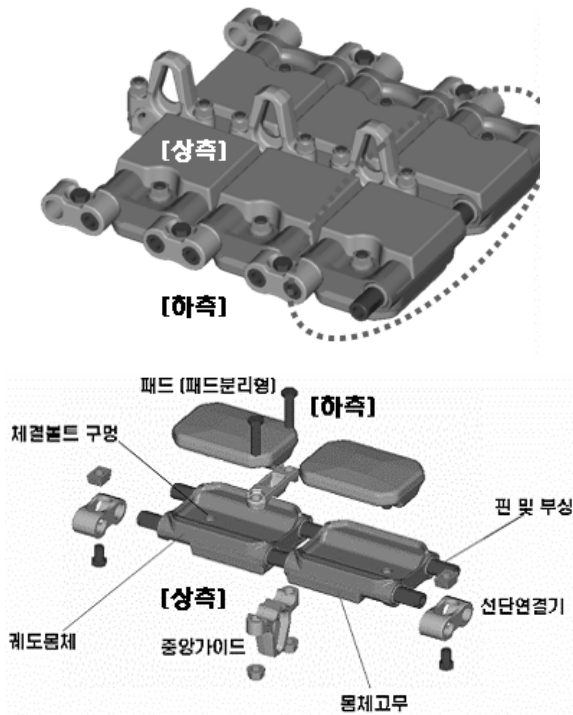
부터 전달되는 차량의 수직 및 횡하중을 받는다. 또한 몸체고무는 휠(로드휠)을 통해서 전달되는 차량의 하중과, 고무로 몰딩된 휠과의 마찰에 의한 횡하중(구름 저항 등)을 받는다.

패드교환형 궤도의 개발 과정에서 발생한 그림 2와 같은 궤도몸체의 균열, 몸체고무의 부풀음(Blow-out), 박리 등의 문제에 대한 원인 규명을 위한 실내 시험과 구조해석을 통해서 보완된 궤도 설계안을 도출하였다^[1].

궤도의 박리는 궤도슈우와 몸체고무간의 접촉면이 분리되는 현상으로서, 내부 열 축적에 의한 고무의 열변형, 고온에서의 접착제 접착력 저하, 접촉면에서의 응력 집중 등이 복합적으로 작용한 것으로 추정되었다. 예로써, 열에 의해서 몸체고무에 부풀음이 발생한 부품의 단면에서 그림 3과 같이, 핀홀부 내측 상부에 박리가 시작되었음을 확인하였다.

궤도의 박리에 대해서, 열에 의한 영향(예를 들면, 열변형)을 고려하기 위해서는 고무 내부의 온도 분포를 정확히 측정 또는 예측해야 한다. 그러나, 궤도조립체 단면의 온도 분포는 측정이 어려울 뿐만 아니라, 온도 예측을 위한 물성치 데이터 또한 확보되지 못함으로써, 열에 의한 영향을 제외한 기계적 응력 해석에 국한하여 궤도의 박리 발생 메커니즘을 도출한 바 있다^[2]. 로드휠이 궤도몸체 위를 굴러갈 때 몸체고무와 궤도슈우 접촉면에서 전달응력의 변화폭(amplitude)이 최대가 되는 지점에서 피로(Fatigue)누적에 의해서 박리가 시작될 것이라는 예측이 시험에서의 박리 시작과 잘 일치하는 결과를 얻은 바 있다^[2].

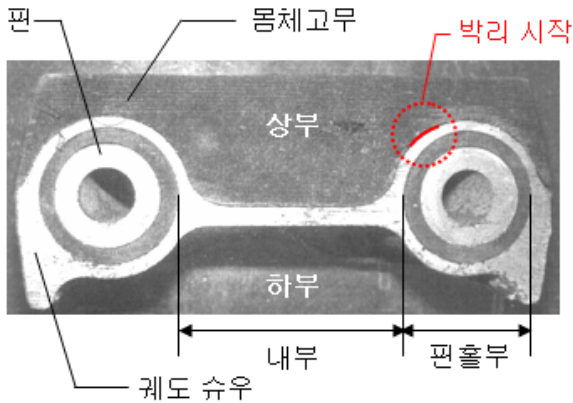
기존의 연구는 박리의 시작 위치를 예측하는데 국한하였으나, 본 연구에서는 박리를 모델에 추가하여, 초기 박리(initial separation)의 성장 모드를 예측하



[그림 1] 패드교환형 궤도 형상



[그림 2] 궤도 손상 유형



[그림 3] 몸체고무의 박리 개시

는 범위까지 확장시켰으며, 시편에 대한 인장시험 결과와의 비교를 통해서 예측 결과의 타당성을 검증하였다. 수치해석에는 비선형 구조해석에 많이 사용되는 상용 코드인 ABAQUS를 이용하였다.

2. 유한요소 모델

가. 접촉문제의 소개

비선형 문제는 재료의 비선형성, 기하학적 비선형성, 경계조건의 비선형성 문제로 나눌 수 있으며, 접촉은 경계조건의 비선형에 해당한다. 접촉은 국부적인(Local) 영역에서 해의 정확도 향상에 기여하지만, 비선형 특성이 해의 수렴을 어렵게 한다.

접촉 문제는 Hertz에 의하여 처음으로 연구되었으며, 해석적으로 변위를 구할 수 있는 단순한 형상에 대하여 접촉 압력의 분포를 가정하여 접촉 영역과 접촉 압력을 구하였다. 최근 전자계산기와 구조해석 소프트웨어 기술의 발달에 힘입어 복잡한 형상의 접촉 문제도 계산이 가능해졌다.

유한요소법을 이용한 접촉 해석은, 접촉하는 두 물체에 대한 각각의 선형 연립방정식을 얻고, 이 방정식들과 접촉점에 대한 접촉 조건 즉, 접촉면의 틈새(Clearance, h)와 접촉압(Contact pressure, p)에 대한 구속조건을 동시에 만족시키는 에너지 포텐셜(Energy potential)을 수식화하고, 이를 최소화하는 문제의 해를 구하는 방법이다.

에너지 범함수식의 계산에는 Lagrange multiplier 와 Penalty method가 주로 사용된다. Lagrange multiplier method는 에너지 범함수식을 최소화하는 접촉압력 p 를 직접 계산하는 방법으로서, 수렴성의 문제가 있으나, 정확도가 높은 해를 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 연구의 모든 수치해는 Lagrange multiplier method를 이용하여 계산되었다.

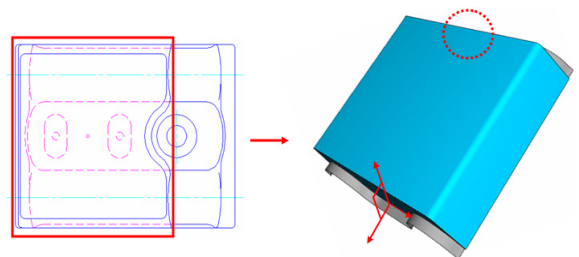
나. 유한요소 모델링

본 연구의 목적은 케도조립체에 대한 유한요소 해석을 통해서, 전단응력의 분포와 박리 모드를 예측하는데 있다. 케도의 모델링에는 3차원 솔리드, 강제 요소를 사용하였으며, 수렴성과 계산속도를 개선시키기 위해서, 그림 4에 표시한 부분과 같이, 관심 밖의 부분은 형상을 단순화시켰다.

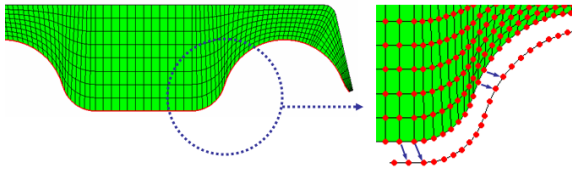
로드휠은 알루미늄 바디에 고무가 몰딩되었는데, 바디는 강체로, 고무 부분은 솔리드 요소로 모델링하였다. St. Venant 정리에 따라서, 접촉이 발생하는 영역을 충분히 포함하도록 $\pm 30^\circ$ 범위까지 모델링하였다^[4].

고무층과 바디가 절점을 공유하도록 모델링된 로드휠과는 달리, 케도 슈우와 몸체고무의 접촉면은 접촉 응력을 얻기 위해서, Contact으로 정의하였다. 박리가 없는 접촉된 상태를 모사하기 위해서, ABAQUS의 “Tied Contact”기법을 적용하였다. 이를 위해서, 케도 슈우 상부와 몸체고무 하부면에서, 동일한 위치에 두개의 절점을 생성하고, 그림 5와 같이, 한 절점은 몸체고무에, 다른 한 점은 케도 슈우에 속하도록 모델링하였다. 생성된 로드휠-케도조립체의 3차원 유한요소 모델은 그림 6과 같다.

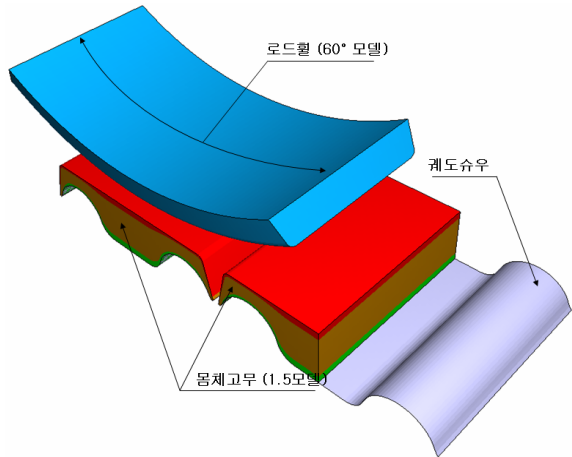
고무는 로드휠 바디, 케도슈우의 재료인 알루미늄,



[그림 4] 케도 몸체의 형상 단순화



[그림 5] 몸체고무-케도슈우 접촉면 모델링



[그림 6] 케도조립체-로드휠 해석 모델

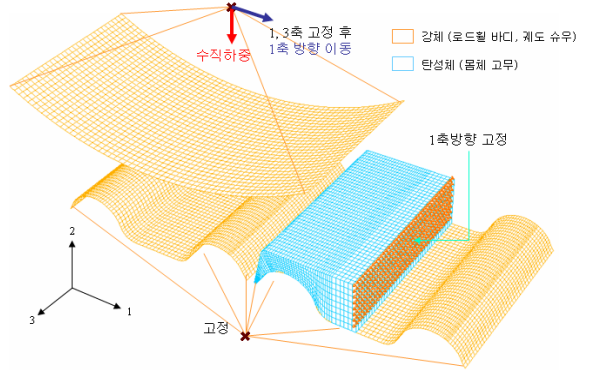
스틸에 비해서 약 1/1000 이하의 강성을 갖고 있으므로, 로드휠 바디의 알루미늄과 케도 슈우의 스틸을 강체로 모델링하였다.

시편을 이용한 실험에서 박리 발생 이전까지 하중-변위 곡선은 선형에 가까운 거동을 보였다. 따라서, 본 연구에서는 고무의 비선형적인 초탄성 거동을 선형으로 가정하고, 탄성계수(Young's modulus) 9.0 MPa, 포아송비(ν) 0.49를 적용하였다.

다. 경계 조건

로드휠과 케도몸체의 접촉면, 몸체고무와 케도슈우 접촉면에 대하여 시험 조건과 유사한 경계 조건을 설정하고자 하였다.

강체로 모델링된 부분의 기준점에는 수직하중과 변위 구속 조건을 부여하였다. 즉, 강체로 모델링된 케도슈우의 기준점의 모든 자유도를 구속하였다. 로드휠 바디의 기준점은 종(1), 횡(3)방향의 자유도를 구속하고, 3.0 ton의 수직 하중을 부과하여 케도의 접촉이 발생한 후, 종방향으로 일정 간격으로 변위를 증



[그림 7] 변위 및 하중 경계조건

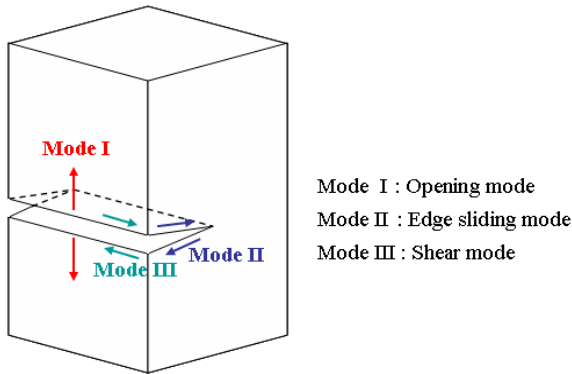
가시키는 방식으로 로드휠을 이동시켰다. 예지에서 휠과 안정적인 접촉 유지를 위해서, 그림 7과 같이 추가된 케도 half model에 대해서는 로드휠과의 접촉을 제외한 영역에 대해 대칭 구속 조건을 부여하였다.

접촉면에 “Tied Contact”과 “Tie constraint”를 적용하였다. 두 방법 모두 경계면을 결합하는 방식이다. “Tied Contact”은 “Contact pair”의 옵션으로서, 면 내 전단응력이 계산된다.

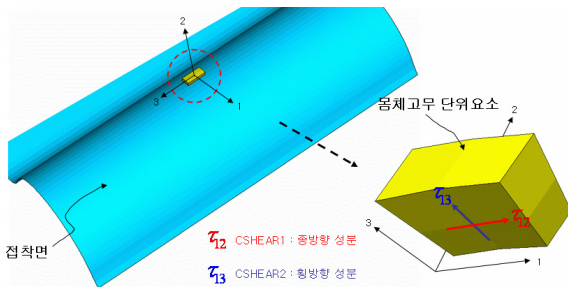
그러나, “Tie constraint”는 별개로 mesh된 두 구조를 단순 결합시키는 역할만 하며, 경계면에서의 응력은 계산되지 않는다. 후자로 모델링할 경우, 해석 과정에서 접촉여부를 판단하는 단계를 수행하지 않으므로써, 계산 시간의 단축 효과가 있다. 로드휠과 접촉하는 케도 full model에 대해서는 접촉면에 “Tied Contact” 조건을 부여한 반면에, dummy인 케도 half model에 대해서는 “Tie constraint”로 구속하여서 수렴성 개선 및 해석 시간 절감 효과를 얻었다. 몸체고무와 케도슈우 경계는 탄성체-강체간의 접촉이므로, 몸체고무의 하부면을 slave surface로 설정하였다.

라. 박리(Separation) 모델링

유한요소법을 이용하여 박리를 모델링하고 박리의 성장을 예측하는 것은 많은 모델링과 해석시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 박리의 시작 판별 후, 미세한 박리가 시작된 상태에서의 응력 변화를 예측함으로써, 박리의 초기 성장 모드를 예측하는 범위까지 해석을 수행하였다. 파괴역학 관점에서 균열의 성장은 그림 8과 같이, 크랙 팁에서 인장 방향으로



[그림 8] Crack 팁의 거동



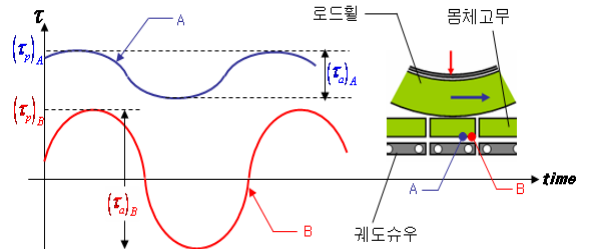
[그림 9] 접착면내 전단응력 성분

의 Opening, 면 내에서 크랙 팁에 수직방향의 Edge sliding, 크랙 팁에 평행한 Shear mode로 나뉜다^[5].

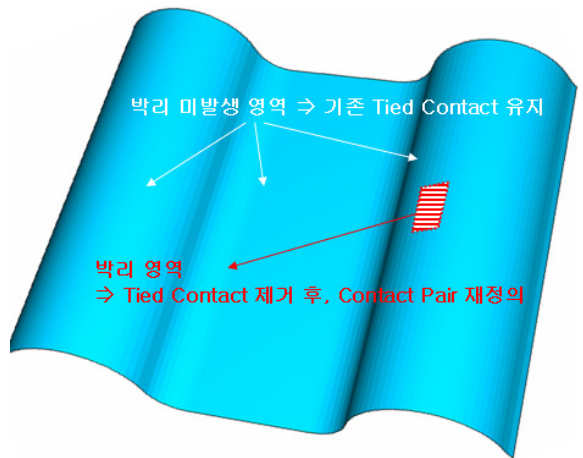
몸체고무와 퀘도슈우의 접착면 내에는 그림 9와 같이, 종(1)방향 성분(τ_{12})과 횡(3)방향 성분(τ_{13})의 전단응력이 존재한다.

휠(또는 수직하중)의 이동에 따른 접착면내 특정점에서의 전단응력의 변화를 그림 10에서 개념적으로 보여주고 있다. 접착면 상의 두 점 A와 B의 전단응력을 비교해 보면, A점의 전단응력은 전반적으로 B보다 높으나, B점의 전단응력은 방향이 (+), (-)로 바뀌면서 응력진폭값이 A보다 훨씬 크다. 퀘도 박리에 관한 기계적 응력해석 연구에서 얻은 τ_{12} 의 변화폭이 최대인 지점과 실제로 박리가 발생한 위치가 일치함을 확인하였으며^[2], 본 연구에서도 박리 개시 위치는 τ_{12} 의 변화폭의 최대값을 퀘도 슈우 상의 전 영역에 대하여 비교해서 이 값이 최대가 되는 지점으로 예측하였다.

응력 해석에서 전단응력 변화가 최대가 되는 절



[그림 10] 휠 이동에 따른 전단응력 변화 개념



[그림 11] Crack Surface 정의

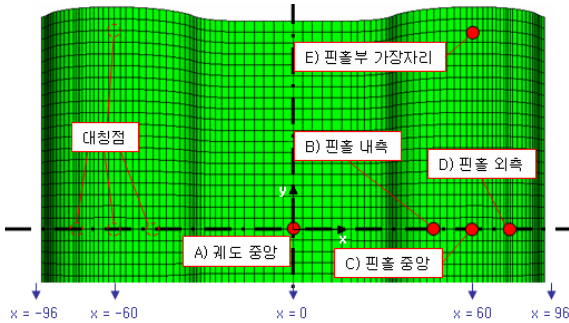
점을 공유하는 4개의 유한요소에 대해서 그림 11과 같이, 새로운 Contact을 정의하였다. 즉, 해당 요소에 대한 기존의 Tied Contact은 삭제하고, 면과 면간의 접촉(Contact pair)을 새롭게 정의하였다. 이렇게 생성된 면을 본 논문에서는 박리 계면(Separated Interface)이라 칭하였다.

3. 수치해석 결과

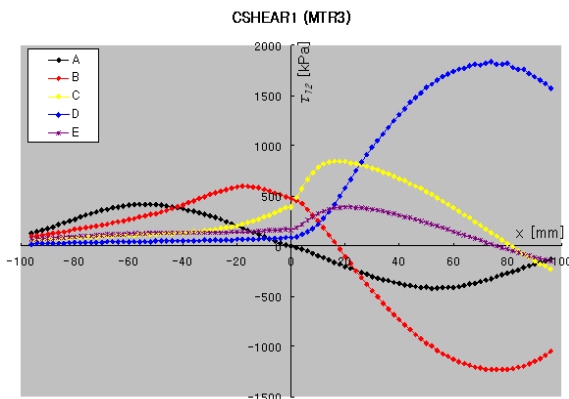
차량의 수직하중에 의한 퀘도의 박리 발생 메커니즘 도출을 위해서, 퀘도 설계안에 대한 유한요소 해석을 수행하여, 퀘도슈우와 몸체고무 접착면 및 박리 계면에서의 거동을 예측 분석하였다.

가. 박리 개시 위치 판별

우선, 박리가 발생하지 않은 퀘도조립체 모델상에



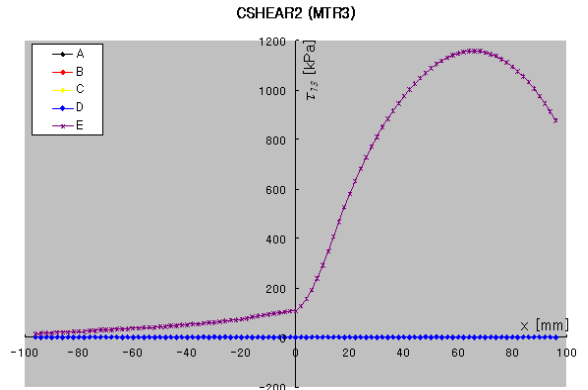
[그림 12] 웨도 접착면에서 전단응력 예측 부위



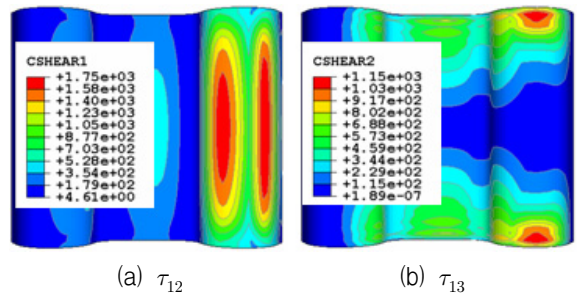
[그림 13] 종방향 전단응력(τ_{12}) 변화

휠을 중앙($x=0$)에서 선단부($x=96$)로 이동시키면서, 계면에서의 각 전단응력 성분의 시간(또는 휠의 위치)에 따른 변화를 관찰하였다. x 는 종방향, y 는 횡 방향을 의미한다. 하중(휠)의 이동에 따라, 그림 12에 표시된 웨도슈우 접착면상의 A, B, C, D, E 다섯 점에서의 종방향(τ_{12}), 횡방향(τ_{13}) 전단응력의 시간에 따른 변화는 그림 13, 그림 14와 같다.

종방향 전단응력(τ_{12})은, B(핀홀 내측)와 D(핀홀 외측) 지점에서 가장 크게 집중되었으며, 변화량도 크게 나타났다. 특히, 휠이 핀홀 상부($x=65\sim 80$ 구간)를 지날 때, B와 D에서 τ_{12} 가 가장 크게 발생하였다. 횡 하중이 부과되지 않았으므로 힘평형을 고려하면, 중앙에 위치한 A, B, C, D 지점의 횡방향 전단응력(τ_{13})은 0이며, 휠이 핀홀 상부를 지날 때, 핀홀부 가장자리인 E에서 τ_{13} 가 최대가 되었다. 박리 시작 위치인 내부에서는 횡방향 전단응력이 종방향 성분에



[그림 14] 횡방향 전단응력(τ_{13}) 변화



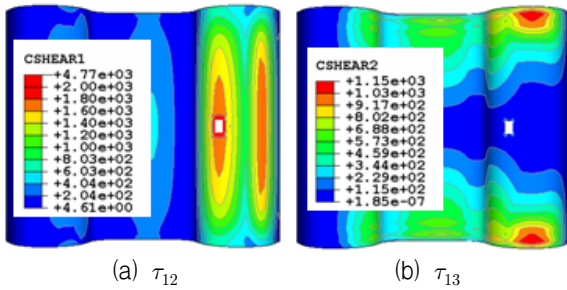
[그림 15] 전단응력의 최대 변화(amplitude)

비해서 상당히 작으므로, 응력 관점에서 웨도 박리에 종방향 전단응력(τ_{12})이 지배적으로 작용한 것으로 판단된다.

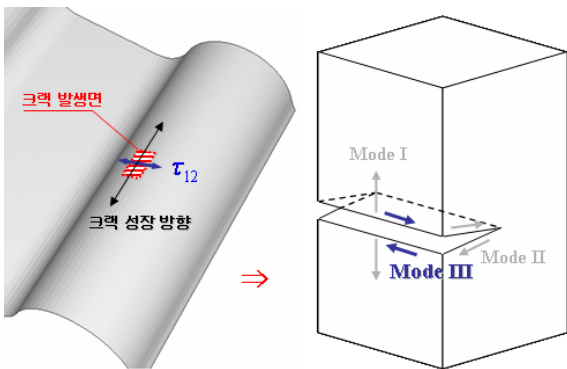
하중(휠)에 따른 전단응력값을 이용하여 계산된 최대 변화량 또는 진폭(amplitude) 분포는 그림 15와 같다. 그림에서 τ_{12} 의 응력진폭이 최대 즉, 1.75MPa로 계산된 B점(핀홀 내측)에서 박리가 시작되었을 가능성이 큰 것으로 예측되었다. 이 응력값의 박리 유발 가능성을 확인하기 위해서 뒤에서 시편에 대하여 인장시험을 수행하여 안전율을 계산하였다.

나. 박리 성장 모드

앞 절에서 예측된 박리 개시 위치(핀홀 상부 내측)에 놓인 4개의 유한요소로 구성된 미소영역에 별도의 접촉 조건(접착되지 않은 일반 접촉조건)을 부여한 후, 접촉 해석을 재수행하였다. 박리 개시후의 접촉면에서의 종방향 및 횡방향 전단응력 최대 변화량은 그



[그림 16] 박리 개시후 전단응력 최대 변화



[그림 17] Crack 성장 모드 예측 결과

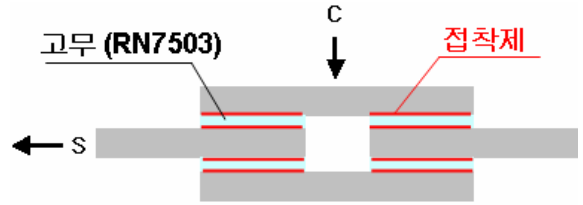
림 16과 같다.

박리 개시 전의 전단응력의 최대 변화는 종방향으로 약 1.75MPa, 횡방향으로 약 1.15MPa 수준이었다. 박리 발생 후, 박리 계면의 끝단에서 종방향 전단응력 변화량이 4.7MPa까지 증가하였으나, 횡방향 전단응력은 박리 발생 전후에 거의 차이가 없었다. 다시 말해서, 미세하게 박리가 시작된 후에는 박리의 근방에 τ_{12} 의 급격한 증가 즉, 응력집중에 의해서 박리가 급속히 성장한 것으로 예측되었다.

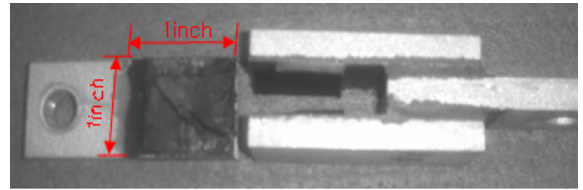
또한 박리 초기의 성장 모드에 대해서는 그림 17과 같이, 박리 발생 후 웨도의 박리는 성장 방향에 수직인 방향인 τ_{12} (종방향 전단응력)에 의해서 성장하였다 (Mode III 크랙)는 결론을 얻었다.

4. 시험 결과

응력 해석을 통해서 얻은 열변형을 제외한 웨도 박



[그림 18] 접착력 시험 시편

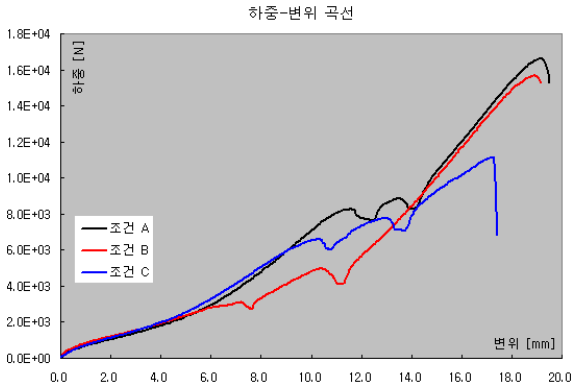


[그림 19] 접착력 시험편 파단 형상

리 메커니즘의 검증을 위해서, 웨도 고무와 접착제 시편에 대한 접착력 시험을 수행하였다. 그림 18과 같은 시편에 인장하중(S) 증가에 따른 접착면 파단까지의 하중과 변위를 측정하였다. 1[in²] 면적의 고무 표면에 접착제를 도포한 후, 인장시험 속도는 40mm/분으로 설정하였다. 시험에 사용된 접착제는 박리가 발생되었던 Chemlok 205/220 모델이다. 박리의 원인을 하중에 의한 계면의 응력집중과 열에 의한 접착력 저하로 추정하였으며, 하중과 온도에 대한 각각의 영향도를 비교하고자 시편에 인장하중을 부과하기 전에 다음의 전처리를 실시하였으며 시험결과, 그림 19와 같은 형태로 접착면에서 파단이 일어났다.

- 조건 A : 상온, 수직하중 미부여
- 조건 B : 상온, 수직하중(변위 1mm) 10회 반복
- 조건 C : 125°C 3시간 유지, 수직하중 미부여

시편에 대한 인장하중과 변위에 대한 시험결과는 그림 20과 같은 형태를 보였다. 최종적인 파단은 10kN이상에서 발생하였으나, 접착면에서의 박리 발생에 의해서, 순간적으로 변위가 증가해도 하중이 오히려 감소하는 구간 또는 peak가 2번 나타나는 특징을 보였다. 첫 peak에서 박리가 시작되었다고 볼 수 있다. 이 때의 접착면내 전단응력을 전단 항복응력이라 하였다.



[그림 20] 접촉력 시험 결과

조건 A는 8.2kN에서, 조건 B(수직하중 처리)는 3.1kN에서, 조건 C(고온 처리)는 6.6kN에서 박리가 개시되었다. 이 결과로부터 몸체고무의 박리에는 열에 의한 영향보다 수직하중에 대한 영향이 크다고 판단된다. 또는, 수직하중을 부과하는 전처리 과정에서 이미 미세한 박리 또는 결함이 발생하였다고 볼 수 있다.

조건 B(수직하중 부여)의 전단항복 응력(τ_y)은 식 (1)과 같이, 2.4MPa로 계산되었다. 시편의 양면에 접촉면이 존재하므로, 계산시 하중을 2로 나누었다. 단, 시험을 통한 전단항복 응력 계산에서 하중을 단순히 접촉면적으로 나눔으로써, 국부적인 응력집중의 효과는 고려하지 못하였다.

$$(\tau_{12})_y = \frac{3.1 \times 10^3 / 2}{(25.4)^2 \times 10^{-6}} = 2.4 [MPa] \quad (1)$$

앞의 응력 해석에서, 박리 미발생시는 1.7MPa, 박리 개시 후에는 4.8MPa의 종방향 전단응력 최대 진폭(amplitude)이 계산되었다. 박리 미발생시는 전단항복 응력보다 낮은 응력수준을 보이지만, 박리가 발생한 후에는 급속히 박리가 진전되었을 것이라는 예측이 가능하다.

응력집중을 제외한 전단항복 응력(2.4MPa)에 대한 박리 미발생시의 종방향 전단응력 진폭(1.7MPa)의 안전율은 1.41로서 비교적 안전하다고 볼 수 있으나, 응력집중이 고려될 경우는 안전율이 이보다 낮아져서 박리를 유발할 가능성이 크다.

5. 결론

본 연구에서는 궤도 접촉면에서의 박리의 발생과 성장에 대한 기계적인 메커니즘을 밝히기 위해서, 로드휠과 궤도조립체에 대한 유한요소 모델에 실차와 유사한 하중조건을 구현하여 응력해석을 수행하였으며, 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 하중 이동에 따른 궤도 접촉면내 주요 지점에서의 전단응력 변화 예측과 시편 시험 결과, 박리가 시작된 핀홀 상부 내측에서 휠이동 방향으로의 전단응력 변화 진폭이 최대였으며, 이 응력성분이 박리의 유발에 지배적으로 작용한 것을 확인하였다.
- 2) 핀홀 상부 내측에서 박리 개시후 박리가 없을 때의 3배 수준의 응력이 집중됨으로써, Shear mode (Mode III) 형태로 박리의 성장이 가속화되는 것이 예측되었다.
- 3) 핀홀 상부 내측에서 계산된 최대 종방향 전단응력 1.7MPa은 접촉체의 전단 항복응력 2.4MPa이상이며, 안전율은 1.41이었다.
- 4) 본 논문의 해석 결과를 통해서, 궤도 설계안의 박리에 대한 안전도를 사전 예측해 볼 수 있으며, 앞으로 궤도 설계 및 접촉력 성능 평가에 본 논문의 방법을 활용할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 최교준 외, “위상최적설계를 이용한 흑표 궤도 개발”, 제14회 지상무기체계 발전 세미나, 2006.
- [2] 이경호 외, “계면 전단응력 해석을 통한 흑표 궤도몸체 내구성능 변화 예측”, 국방과학연구소, 2006.
- [3] Hibbit, Karlsson and Sorensen, “Contact in ABAQUS/Standard”, ABAQUS Inc., 2006.
- [4] Crandall, Dahl, Lardner, “An Introduction to The Mechanics of Solids”, McGraw-Hill, 1972.
- [5] L. P. Pook, “Linear-elastic Fracture Mechanics for Engineers”, WIT press, 2000