

〈 논문 〉

## OHT 차량 벨트 동특성 및 피로 수명에 관한 연구

정일호\* · 박태원† · 김창수\* · 조동협\*\* · 박중경\*\*  
(2005년 2월 14일 접수, 2005년 7월 5일 심사완료)

### A Study on Dynamic Analysis and Fatigue Life of the Belt in the OHT Vehicle

Il-Ho Jung, Tae-Won Park, Chang-Su Kim, Dong-Hyeob Cho and Joong-Kyung Park

**Key Words :** Multi-Body Dynamic(다물체 동역학), Dynamic Load(동하중), Fatigue Life(피로 수명)

#### Abstract

The OHT(Over Head Transportation) Vehicle transports heavy products quickly and repeatedly at the industrial workplace. The belt in the OHT vehicle is used to support the weight of the OHT Cage. The fatigue of the belt is caused by the dynamic load during the operation time. Since the fatigue fracture of the belt affects the safety at the workplace, the correct prediction of the dynamic load is necessary to calculate the fatigue life of the belt on the design step.

In this paper a computer aided analysis method is proposed for the belt in the early design stage using dynamic analysis, stress analysis, belt tensile test, belt fatigue test and fatigue life prediction method. From the dynamic load time histories and the stress of the belt FE model, a dynamic stress time history is produced. Using linear damage law and cycle counting method, fatigue life cycle is calculated. The method developed in this paper is used to reduce the time and cost for designing the OHT belt in different environment and condition.

#### 1. 서론

생산 현장 위로 제품을 수송하는 OHT(Over Head Transportation) 차량은 많은 제품을 동시에 운반할 수 있고, 현장 위의 사용하지 않는 공간을 이용하여 공간 효율성을 높일 수 있다는 장점이 있다. OHT 차량은 짐을 신속하게 승-하강 및 수송 시키기 위해서 짐을 싣는 케이지(cage)는 벨트로 연결 되어있다. 케이지 승-하강 및 주행 중 벨트는 케이지와 짐 하중에 의한 동하중을 받게 되며, 이 동하중은 반복적이고 지속적으로 발생하여 벨트의 피로 파괴를 발생시키는 주 원인이다. 따라서 OHT 차량 설계 단계에서 정확한 벨트 동하중 해석과 피로

수명 예측이 필요하다. OHT 차량의 벨트는 설계 목적과 조건에 따라 다른 하중과 구동조건으로 이용될 수 있으므로 이에 대한 벨트 설계 데이터 베이스가 중요하다.

OHT 차량 벨트의 동하중을 해석하고 피로 수명을 예측하는 것이 본 연구의 목적이며, 이에 필요한 연구내용은 OHT 차량 동역학 모델링, 벨트 인장 및 피로 시험, 벨트 유한요소 모델링 및 정적해석, 벨트 피로 수명 해석이다.

케이지 승-하강 및 OHT 차량 주행 시 벨트의 동하중을 계산하기 위해서는 다물체 동역학 해석 기술을 이용하여 OHT 차량 대한 동역학 모델링이 필요하다.<sup>(1-6)</sup> 신뢰성 있는 동역학 모델은 피로해석을 위한 동하중 이력 산출뿐만 아니라, 제품의 동적 거동을 예측 하는데도 도움을 준다.

우레탄으로 구성되어있는 벨트 물성치에 대한 명확한 재원이 없기 때문에 신뢰성 있는 벨트 물성치 확보를 위해 벨트 인장 시험이 이루어 졌으며, 이 시험으로 벨트의 강성과 탄성계수를 구할 수 있었다.

인장 시험 데이터를 기초로 벨트 유한요소 모델을 구성하여 벨트에서 받는 단위 하중에 대한

† 책임저자, 정회원, 아주대학교 기계공학부

E-mail : park@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2524 FAX : (031)219-1965

\* 아주대학교 대학원 기계공학과

\*\* 삼성전자 기술총괄 메카트로닉스연구소

응력을 구할 수 있다. 이는 벨트 동하중과 선형 중첩되어 벨트 동응력을 구할 수 있다.

벨트 피로시험은 피로 수명 해석에 필요한 벨트의 응력-수명 선도를 확보하기 위해 필요한 과정이다. 피로 수명 해석은 응력-수명(S-N)방법을 토대로 이루어 졌으며, 재료의 탄성 영역 내에 속하고 긴 피로수명을 갖는 벨트에 적합한 해석 방법이다.<sup>(7,8)</sup>

## 2. 벨트 인장 시험

벨트 피로해석수행을 위해 필요한 조건은 Fig. 1 에서처럼 하중 조건(load condition), 정적해석 (analysis model), 재료 물성치(material property) 세 조건으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서 수행한 시험과 연구내용을 바탕으로 하중조건은 OHT 차량 승-하강과 주행 조건에 대한 벨트 동하중을 확보하고, 정적해석은 벨트 유한요소 모델을 구성하여 벨트 물성치를 구하여 동하중을 동응력으로 계산하여 확보하고, 재료 물성치의 정보는 벨트 인장시험과 피로 시험으로 벨트 물성치와 응력-수명 선도를 확보하는데 목적이 있다.

## 3. 벨트 인장 시험

### 3.1 벨트 인장 시험

본 연구를 위한 벨트 인장 시험에 관한 자료는 일본에서 입수한 것이 있었으나 OHT 차량에 사용되는 철심이 22 본인 벨트를 직접 실험한 것이 아니라 11 본 벨트의 시험 결과를 토대로 예측한 자료였기 때문에 정확한 모델링을 위하여 우선 자료가 타당한지 여부를 검증하려고 시험을 수행하였다. 시험의 형상 규격은 Fig. 2 와 같이

ASTM D3039 (2002)에 따라 제작되었다. 시험장비는 Fig. 3 과 같이 MTS 810 시스템이다.

### 3.2 벨트 인장 시험 결과

#### 3.2.1 변위와 하중

D사에서 받은 자료(Fig. 4)를 이용하여 벨트 강성을 계산하면 Table 1 과 같은 값을 얻을 수 있다. 자료에서 보면 알 수 있듯이 벨트의 변위가 하중에 따라 선형적으로 변한다. 길이 150 mm 벨트 강성을 이용하여 변위 대 하중 그래프를 그려보면 Fig. 5 ~ 7 과 같이 시험한 결과와 하중이 10 kN 일 때까지 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. OHT 차량의 케이스 프레임이 103 kg (1 kN) 이고 최대 적재량이 150 kg (1.47 kN) 이므로 벨트에 걸리는 부하가 총 약 2.5 kN 임을 감안하면 벨트의 유한 요소 해석을 선형적으로 해도 타당하다는 것을 알 수 있다.

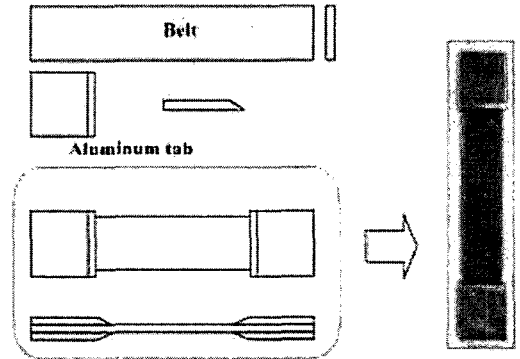


Fig. 2 Configuration of test specimen

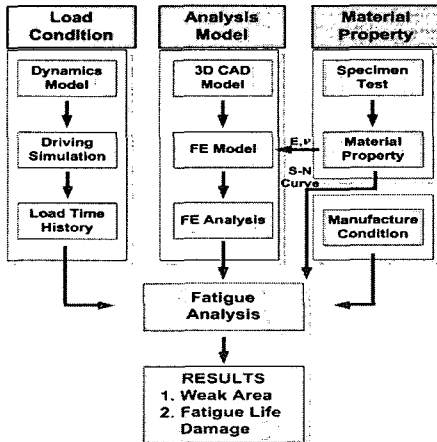


Fig. 1 The process of fatigue life prediction

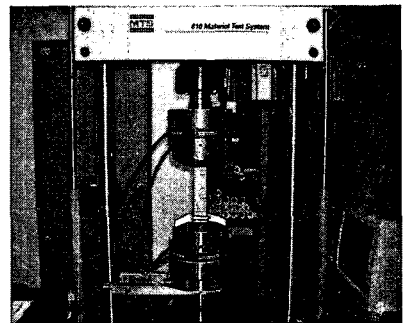


Fig. 3 MTS system

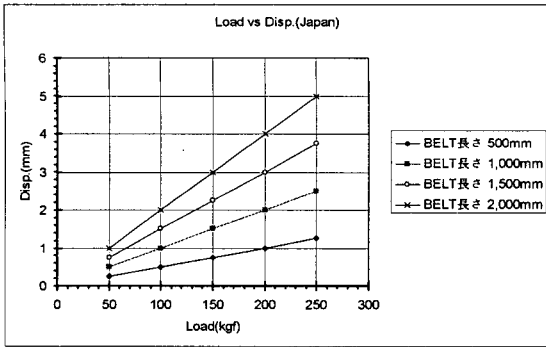


Fig. 4 Load vs. Displacement (Japan)

Table 1 Calculated belt stiffness

belt length(mm)	stiffness(N/mm)
150	6533
500	1960
1000	980
1500	653
2000	490

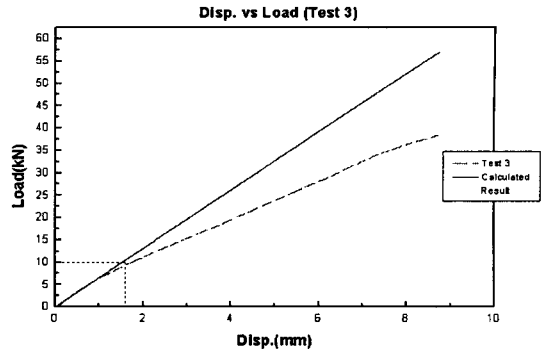


Fig. 7 Disp. vs. Load (test 3)

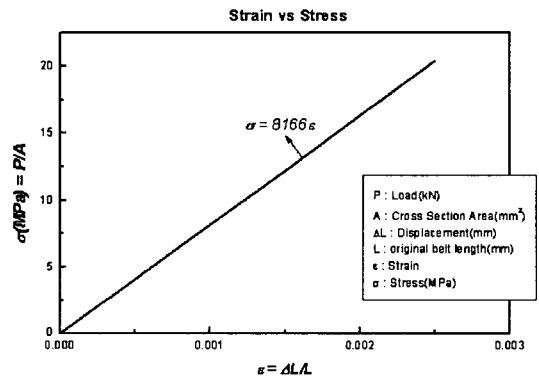


Fig. 8 Strain vs Stress

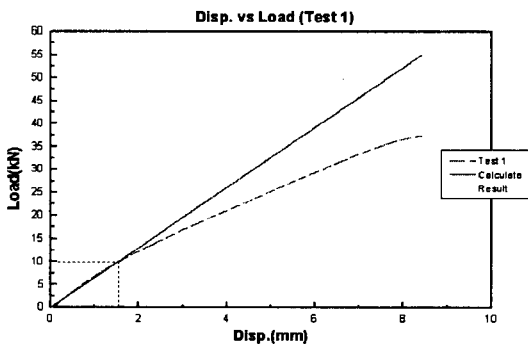


Fig. 5 Disp. vs. Load (test 1)

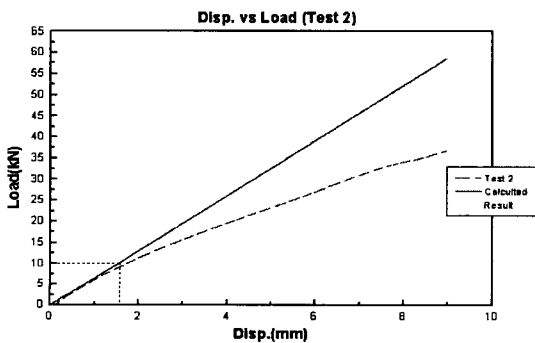


Fig. 6 Disp. vs. Load (test 2)

### 3.2.2 탄성계수

인장 시험으로 타당성이 검증된 Fig. 4 를 바탕으로 각 선도의 기울기를 이용하여 벨트의 길이당 강성을 구할 수 있었다. 그런데 각 선도는 Fig. 8 과 같이 인장률(ε)-응력(σ) 하나의 선도로 나타낼 수도 있는데 이 선도의 기울기가 벨트의 탄성계수이고 그 값은 8,166MPa 이 된다. 이 값은 피로 해석에 이용하게 된다.

### 3.2.3 강성

각 시험에서 나온 인장 강도는 Table 2 와 같이 각 최대 하중에서 벨트의 단면적인 120 mm<sup>2</sup> 로 나눠준 값이 된다. Table 1 과 Fig. 3 결과에서 벨트는 각각의 길이에서 힘의 증가함에 따라 벨트의 길이가 선형적으로 증가하고(고정된 기울기를 갖는다), 길이가 길수록 기울기가 크고 선형으로 증가임을 확인할 수 있다. 이는 곧 벨트의 강성은 벨트의 길이가 길어질수록 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이를 근거로 본 연구에서 OHT 차량 동역학 모델을 위한 벨트 길이 50 mm 에 대한 강성을 19,600 N/mm 으로 유도할 수 있다.

Table 2 Tensile stress

Test No.	Cross Section Area (mm <sup>2</sup> )	Max. Load (kN)	Tensile strength (MPa)
1	120	37.3	311
2	120	36.8	306
3	120	38.3	319
Avg.	120	37.4	312

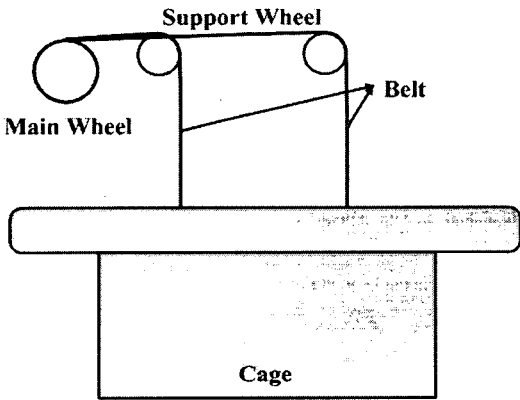


Fig. 9 OHT vehicle hoist belt model

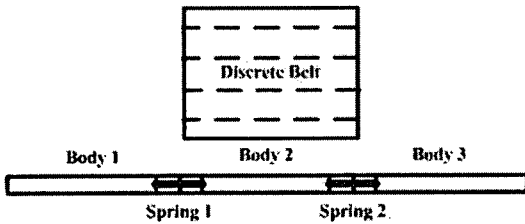


Fig. 10 Discrete belt model

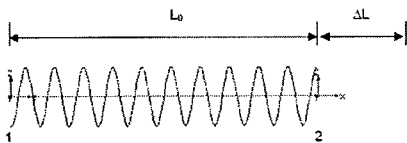


Fig. 11 Change of spring length

4. OHT 차량 벨트 동역학 해석

OHT 차량 벨트에서 발생하는 동하중은 케이지 승-하강과 차량 주행 시 발생한다. 그 중 Fig. 9 는 동역학 해석을 위한 OHT 차량 벨트 동역학 모델이다. 앞, 뒤 두 쌍의 벨트는 케이지 상단 연결 고리에 연결 되어 있다. 벨트 인장력과 접촉력을 포함하고 있는 신뢰성 있는 OHT 차량 벨트 동역학 모델을 구성하기 위해서 호이스트 (hoist) 벨트를 Fig. 10 에서와 같이 여러 개로 이산화하여 모델링 하였다. 이는 Fig. 11 에서처럼 벨트 길이 변화에 대한 탄성특성을 표현할 수 있다. OHT 차량 직선 및 곡선 주행에 대한 OHT 차량 주행 동역학 모델은 Fig. 12 에서 보여주고 있다. 주행 모델은 벨트 모델을 메인 박스(main box)에 장착하였다.

본 연구에서는 벨트를 50 mm 간격으로 나누어서 OHT 동역학 모델링을 구성하였다. 길이 결정은 동역학 모델링과 수치해석에 적합한 길이로 판단하여 결정하였다.

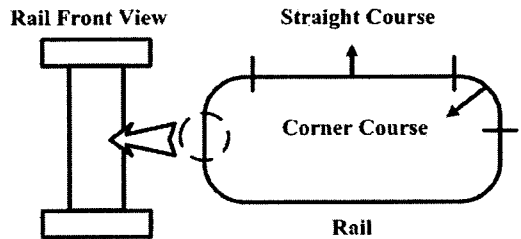
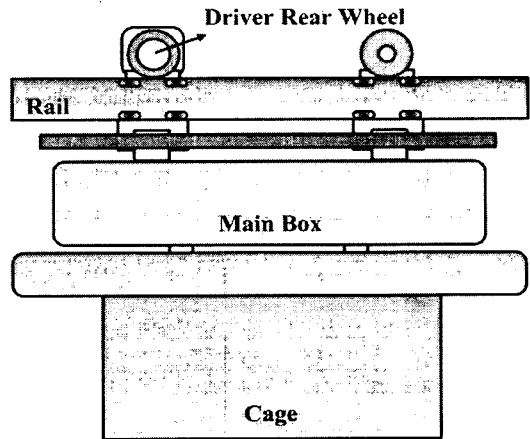


Fig. 12 OHT vehicle travel model

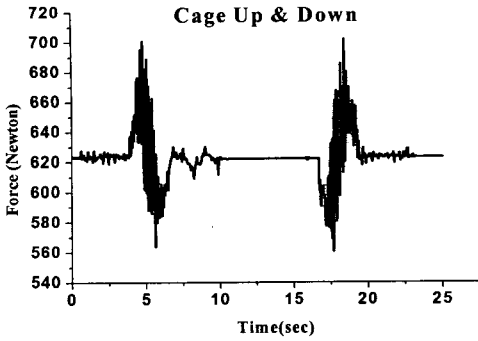


Fig. 13 Cage up-down belt force

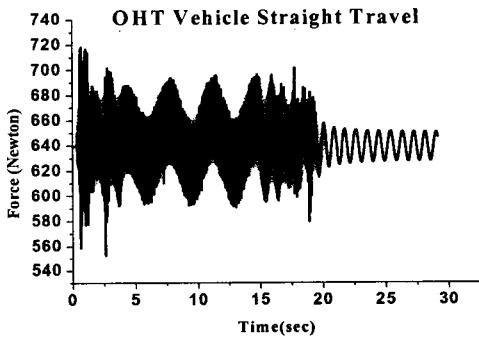


Fig. 14 OHT vehicle straight travel

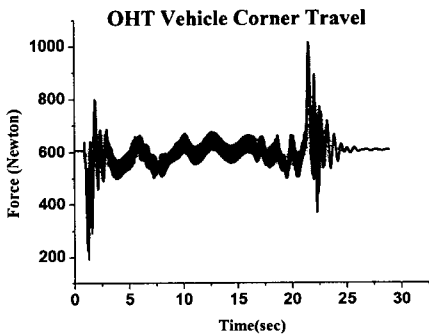


Fig. 15 OHT vehicle corner travel

본 연구에서 다물체 동역학 상용 해석 프로그램인 ADAMS 를 이용하여 Fig. 11, Fig. 12 와 같은 동역학 모델링을 구성하였고, 탄성 특성이 고려된 벨트 동하중을 확보할 수 있었다.

벨트의 피로수명 해석에 필요한 동하중을 구하기 위해 본 연구에서는 벨트와 관련된 모든 운동조건인 케이지 승-하강 시의 결과인 Fig. 13, OHT 차량 직진 주행의 결과인 Fig. 14 및 코너 주행 시의 결과인 Fig.

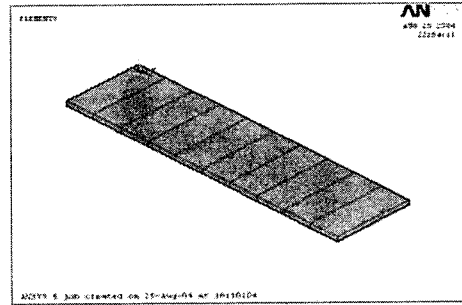


Fig. 16 FE model of belt

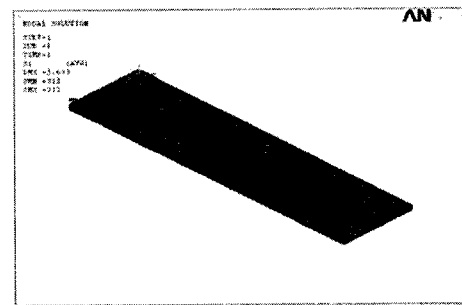


Fig. 17 Result of belt FE analysis

15 에 대한 다물체 동역학 해석을 수행하였고 이에 대한 벨트 동하중을 확보하였다.

## 5. OHT Vehicle 벨트 피로 시험

### 5.1 벨트 유한 요소 모델링 및 정적해석

벨트 유한 모델링의 목적은 궁극적으로 피로수명을 예측하기 위하여 사용될 모델을 구성하는데 있다. 벨트의 피로 시험 결과는 각 시험 하중에 대하여 벨트 시편에 파괴가 발생할 때까지의 반복 횟수이다. 이를 통상 하중-수명선도라 부른다. 하지만 본 연구에서 응력-수명 방법을 제안하였고, 하중을 벨트 단면(120 mm<sup>2</sup>)으로 나누어 S-N 선도를 구성하였다. 따라서 본 벨트 유한 요소모델은 입력하중에 대하여 S-N 선도에서 사용된 응력이 출력될 수 있는 모델이면 충분하다. 즉, 단면이 120 mm<sup>2</sup> 이면 피로해석에서 사용될 유한 요소 모델로 충분하다는 뜻이다. 이에 시편시험에서 사용된 벨트와 같은 형상으로 Fig. 16 과 같은 유한 요소 모델을 구성하였고 한쪽 단을 고정하고 반대쪽 단에 Table 2 에서와 같이 37.44 kN 을 입력했을 때 인장시험의 평균 인장강도 값인 312 MPa 이 출력됨을 Fig. 17 을 통하여 확인하였다.

5.2 벨트 피로 시험

피로 해석에 사용될 S-N 선도를 구하기 위하여 시편의 형상 규격은 인장 시험 시편과 같은 Fig. 2 에서처럼 ASTM D3039 (2002)에 따라 제작되었다. 시험장비는 Fig. 3 과 같이 MTS 810 시스템을 사용하였으며 관련 용어 정의는 다음과 같다. Fig. 18 과 같은 사인(sine) 파형을 사용했으며 피로 8 Hz 의 주파수로 시험을 수행하였다.

- 응력비:  $R = \frac{P_{min}}{P_{max}} = 0.1$
- 평균하중:  $P_{mean} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2}$
- 하중진폭:  $P_{amp} = \frac{P_{max} - P_{min}}{2}$

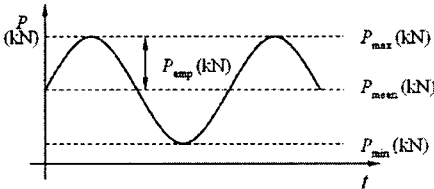


Fig. 18 Input load of sine

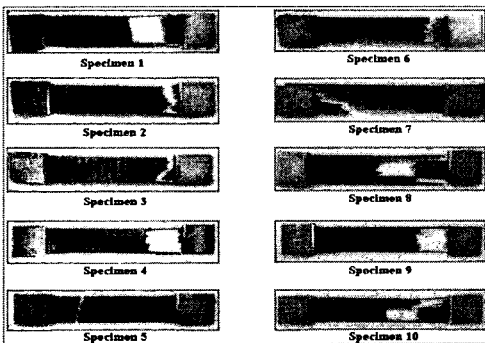


Fig. 19 Result of test

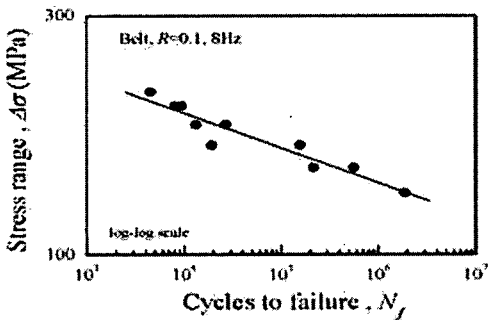


Fig. 20 S-N curve

벨트에 대한 10 번의 피로 시험으로 Fig. 19 와 같은 벨트 피로결과를 확인할 수 있었고, 수집된 피로 수명 데이터로부터 벨트 피로 수명계산에 필요한 Fig. 20 과 같은 벨트 응력-수명 선도를 확보할 수 있었다.

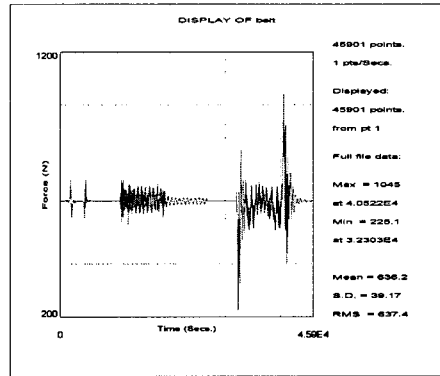


Fig. 21 Dynamics load of hoist belt

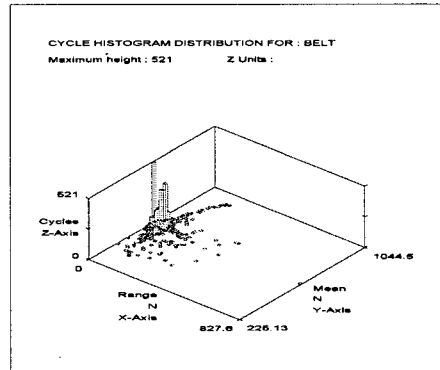


Fig. 22 Cycle counting of hoist belt dynamics load

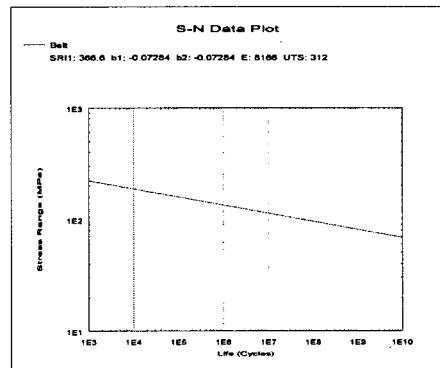


Fig. 23 S-N curve of hoist belt

Table 3 Results of hoist belt fatigue analysis

(Unit: Cycles)

Mean Stress Method	Goodman	Gerber	No Mean
Hoist Belt	Infinite Life	Infinite Life	Infinite Life

## 6. OHT 차량 벨트 피로 시험

벨트 동하중과 정적 해석을 이용하여 벨트가 받을 수 있는 모든 운동 조건을 고려하여 Fig. 21 과 같은 동응력을 구하였고, 동응력을 계산하는 과정은 다음과 같다.

식 (1)에서 보는 바와 같이 벨트 동역학 해석과 정적 해석에서 구한 벨트 동하중이력( $p(t)$ )과 정적응력( $[\sigma_{ij}]_{fea}$ )을 곱하여 각 절점에 대한 동응력이력( $[\sigma_{ij}](t)$ )을 구한다. 만약, 정적해석시 가해진 하중이 단위 하중이 아닌 경우에는 가해진 하중  $P_{fea}$ 로 나누어줌으로써 단위하중에 대한 응력으로 보정한다.

$$[\sigma_{ij}](t) = \frac{[\sigma_{ij}]_{fea} p(t)}{P_{fea}} \quad (1)$$

복합하중이 작용하는 경우 식 (2)에서 보는 바와 같이 각각의 하중에 대한 응력성분을 서로 중첩시킨다.

$$[\sigma_{ij}]_s(t) = \sum_{n=1}^r [\sigma_{ij}](t) \quad (2)$$

한 점에 대한 동응력이력이 계산되면 레인플로 집계(rainflow counting)를 사용하여 각 절점에 대한 응력폭 ( $\Delta\sigma$ )와 평균응력( $\sigma_m$ )을 갖는 여러 개의 싸이를 집계 선도를 Fig. 22 와 같이 구하였다.<sup>(8)</sup>

벨트 피로시험으로 확보한 응력-수명 선도(Fig. 20)를 MSC.FE-FATIGUE 에 입력된 응력-수명 선도는 Fig. 23 과 같다. 그리고 위에서 구한 응력이력으로부터 선형손상 법칙을 사용하여 각각의 응력크기에서의 피로수명 주기수에 해당하는 응력을 계산하여 전체 손상을 합산한다. 이때 손상합이 1 에 도달하면 파단에

이르는 것으로 평가한다.<sup>(8)</sup>

피로해석 수행은 MSC.FE-FATIGUE 를 사용하여 계산된 피로 수명은 Table 3 와 같다.

평균 응력을 고려한 Goodman, Gerber 방법과 고려하지 않는 방법으로 벨트의 수명을 계산하였다. 그 결과 모든 경우에 대하여 무한 수명이 예측되었으며, 이는 산업현장 위로 운행하는 OHT 차량의 경우 캐이지를 지탱하는 벨트는 안정성과 직접적인 관계를 가지고 있어 무한 수명을 설계 목표로 하는 벨트피로 설계에 충족한다.

## 7. 결론

본 연구에서는 OHT 차량 벨트 승-하강 및 주행 시 발생하는 동특성에 관한 연구를 수행하였고 벨트 인장 시험과 벨트 피로 시험으로 물 성치를 확보하여 벨트 수명 계산을 수행하였다. 우레탄과 와이어로 구성되어 있는 벨트는 단순히 하중을 승-하강 시키는 역할뿐만 아니라, 벨트는 캐이지를 승-하강 시키며 작업장 위로 운행 하기 때문에 안전성과 작동성이 고려되는 중요한 역할을 담당하고 있어 이에 대한 피로 수명 예측이 중요하다.

본 연구 수행과정에서 볼 수 있듯이 주어진 하중 조건과 운동 조건에서 OHT 차량 벨트의 수명이 무한임을 확인할 수 있었다. 이 연구를 바탕으로 향후 OHT 차량이 다른 운동 조건과 환경 조건에서 벨트 설계가 이루어질 경우 설계의 효율성과 설계 시간 단축을 증대할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- (1) Nikraves, P.E., 1988, Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems, Prentice-Hall, NJ, pp.199~488.
- (2) Haug, E.J., 1992 Intermediate Dynamics, Prentice-Hall, NJ, pp.118~300.
- (3) Haug, E.J., 1989, Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Volume I: Basic Methods, Allyn and Bacon, MA, pp.1~366.
- (4) Ahmed, A. Shabana, 1989, Dynamics of Multibody System, John Wiley & Sons, pp.89~296.
- (5) Salah Faik, Ph.D., 2000, "Modeling of Impact Dynamics: A Literature Survey", International ADAMS User Conference.
- (6) Sam McDonald, Virtual Model Shop, Inc., 2000, "3D Contact Tip, Examples, and some Implications," International ADAMS Users Conference, Orlando,

- Florida, June.
- (7) Sunghyo Son, Seung-Jin Heo., 2003, "Virtual Durability Test Procedures and Applications on Design of a Vehicle Suspension Module" *Transactions of KSAE*, Vol. 11, No. 4, pp.144~150.
- (8) Julie A.Bannantine, Jess J.comer, James L.Handroce, 1990, *Fundamentals Of Metal Fatigue Analysis*, Prentice-Hall, pp.1~87, pp. 178~231.