

자동차 와이어 하네스 피로내구 해석 방법론 및 시험기기 개발

이 흥 식^{1*}

¹한양대학교 기계공학부

Development of Analysis Method and Experimental Equipment for Fatigue Durability of Automotive Wire Harness System

Heung-Shik Lee^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

Abstract

In this study, the methodology for the fatigue life prediction using finite element method(FEM) in wire, bundle and assembly level of the wire harness system and the development of the fatigue life test machine for the numerical analysis are investigated. To obtain stress-life(S-N) histories of the componential wires of the system, five kinds of wires are prepared and applied to the repeated bending motion using developed fatigue life test equipment. Equivalent model of the wire from the rule of mixtures theory is used for the material modeling of sheath and wire core combination. Contact conditions among the wires, taping conditions are established through the bundle level test and numerical bundle analysis. Wire and bundle level results are adopted for the assembly level analysis. For the assembly level analysis, real wire harness system including bundle and grommet is numerically modeled and applied contact condition between wires with real opening motion. The fatigue life more than 700,000 cycles of the assembly is obtained from the FEM, and it is confirmed that the result has good agreement with the experimental result.

Keywords : fatigue durability, wire harness, equivalent model, wire model, bundle model, assembly model

1. 서 론

차량의 각종 장치로 전기를 공급하는 와이어 하네스 중 도어부는 개폐에 따른 반복적인 굽곡이 발생하고 이로 인해 전선이 손상된다. 와이어의 종류, 와이어를 묶는 테이핑조건, 와이어 간의 간섭이 발생하는 등의 굽곡부 와이어 하네스의 특성 상 시험에 의한 와이어 하네스의 수명 확인은 많은 시간과 비용이 요구되어 진다. 이러한 시간과 노력을 줄이고, 품질 판단의 기준이 될 수 있는 결과 도출을 위해서는 컴퓨터를 이용한 해석모델을 구축하고 해석결과의 정확도를 높이는 방법을 연구하는 것이 필요하다.

이에 여러 선행 연구들이 진행되어 졌으나 피로수명 해석에 필요한 응력-수명 데이터 획득을 해석적인 방법에 의존하여 실제 피로물성과의 오차를 무시하기 어려운 조건들, 혹은

피로수명을 얻기 위한 와이어 굽힘 시험에서 일정한 굽힘 곡률을 보장할 수 없는 시험 조건들, 와이어 간에 발생하는 간섭조건을 무시한 연구 결과들로 인해 보다 실제적인 와이어 하네스 피로내구에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 와이어 하네스의 내구성을 평가하기 위하여 하네스를 구성하는 와이어의 곡률, 와이어간의 접촉조건, 번들에서의 테이핑조건, 그로멧 적용조건이 피로내구 수명에 영향을 줄 것이라는 가정 하에 개별 와이어의 곡률 별 피로수명을 실험적인 방법으로 추출하였고, 개별 와이어와 번들에서의 피로수명을 확인하기 위한 전용 피로시험 장비를 개발하였다.

또한, 해석의 수행을 위해 정립되어야 하는 단일 와이어의 모델링 및 해석방법, 번들의 모델링 및 해석방법 구축으로 점차 복잡화 모델을 구성할 수 있도록 연구하였고 최종적으로

* Corresponding author:

Tel: 82-2-2220-0421; E-mail: jsheung@hanyang.ac.kr

Received March 4 2013; Revised April 29 2013;

Accepted April 30 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 방법을 자동차 운전석 문의 개폐 부분에 장착되는 하네스 시스템에 응용하여 실차 시험 결과와 비교 검증하였다.

해석에 필요한 다양한 기초시험을 실시하였으며 개발된 전용시험기에서는 와이어 단계에서부터 번들까지 다수의 시편을 동시에 원하는 곡률형상에서 피로시험을 할 수 있게 구성하였다. 연구의 주요 결과로 유한요소프로그램을 사용한 실차 해석에서 700,000cycles 수준의 피로수명이 예측되었고 실험결과와 비교 검증되었다.

2. 시험적 연구

수치적 해석을 통한 와이어 하네스 내구성 평가는 필수적으로 와이어 및 번들의 시험이 수반되어야 한다. 시험을 통하여 수치적인 해석에 필수적인 물성치를 도출하게 되며, 시험은 와이어에 구성된 재료에 인장력을 가하여 재료 물성치를 얻는 재료시험과 와이어 및 번들에 피로하중을 가하여 피로 물성치를 얻는 피로시험으로 구성된다.

본 연구에서 와이어의 재료시험과 피로시험은 개별 와이어의 물성치를 확보하여 번들 및 실차 조건의 와이어 하네스 내구성 평가를 위해 사용하는 목적이며, 번들의 피로시험은 각 번들의 테이핑 및 접촉조건에서 수명을 도출하고 해석 결과와 비교하기 위함이다. 최종적으로 실차 내구 시험은 수치적인 피로내구 해석결과와 비교하여 와이어 하네스의 내구성 평가를 검증하기 위한 것이다. Table 1은 도선과 피복의 재료시험 결과와 타 연구결과에서 제시한 Cu 와이어의 물성치를 함께 보여준다. 타 연구결과와의 차이는 도선을 이루는 소선의 미세 직경 차이 및 꼬임방식 등의 차이로 사료된다.

Table 1 Material properties of wire core and sheath

	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m ³)
Wire core	16547	0.3	8900
Sheath	175	0.4	1450
Cu wire(Ref.)	16800	0.3	8960

2.1 와이어(Wire) 및 번들(Bundle)의 피로시험

피로시험 기기를 통하여 일정한 온도조건(23℃)에서 와이어 및 번들에 반복적인 일정한 곡률을 부여한다. 실차 조건에서 와이어 하네스가 구동될 때 와이어 및 번들이 구동되는 곡률범위와 동일한 곡률범위에 대한 피로시험을 실시하도록 한다. 이때 반복적인 일정한 곡률은 해석상에서 와이어에 작용하는 일정한 응력으로 표현이 가능하며 결국 피로시험을 통한 곡률 별 수명과 수치적인 해석을 통해 얻는 곡률 별 응

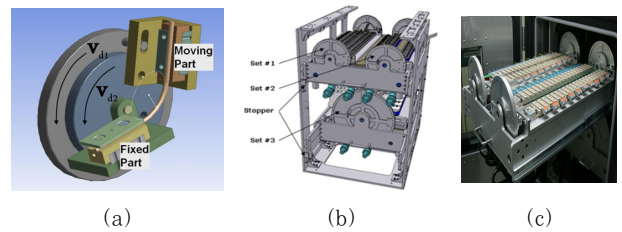


Fig. 1 Experimental equipment set up for wire and bundle fatigue test. (a) Virtual product view, (b) Real product view

력을 통해 응력-수명 그래프를 도출하게 된다.

피로시험 기기는 와이어 및 번들을 지그(jig)에 장착시켜 피로하중을 부여하는 기기로 일정한 온도조건에서 일정한 곡률을 와이어 및 번들에 부여하는 기능을 한다. 본 연구에서는 와이어 및 번들에 실차와 동일한 온도조건과 곡률범위를 가변적으로 부여할 수 있도록 하여 실차와 동일한 피로수명 결과를 얻을 수 있는 와이어 및 번들 피로수명 시험장비를 제작하였다. Fig. 1의 (a)는 피로시험 장비의 곡률형성 운동부의 구동원리를 나타내며, 생성되는 곡률반경의 접선방향 각도를 유지하기 위해 2개의 모터와 기어의 회전 속도차를 이용하여 $V_{d1} > V_{d2}$ 를 유지하게 제작하였다. Fig. 1의 (b)는 개발된 피로시험 장비의 3D CAD 모델 형상을 보여주며 총 3개의 세트로 구성되어 와이어 및 번들의 직경에 따라 시험이 가능하도록 설계하였다. Fig. 1의 (c)는 제작 완성된 피로시험 장비의 사진을 나타낸다.

제작된 피로시험 기기의 사양은 Table 2와 같다. 와이어의 수명은 소선 한 가닥의 단선과 피복의 파괴로 정의하며, 2개 이상의 와이어로 구성된 번들도 와이어와 동일하게 수명을 정의한다. 와이어와 번들의 수명판단은 피로하중으로 와이어 내의 소선이 한 가닥 단선될 때 발생하는 전압 강하치로 와이어의 단선 여부를 판단한다. 소선이 단선될 때 와이어의 전압은 상승하게 되며 와이어의 종류와 단선되는 소선의 개수에 따라 전압 상승치는 다르다. 와이어와 번들의 소

Table 2 Specification of the fatigue test equipment

Specifications of fatigue equipment		
Radius of curvature, R (mm)	Set #1	R7.5 ~ R40
	Set #2	R15 ~ R100
	Set #3	R40 ~ R120
Motor speed (pls/sec)	Set #1	15000 pls/sec
	Set #2	15000 pls/sec
	Set #3	5000 pls/sec
Jig diameter (mm)	Set #1	Wire Ø 0.8 ~ Ø 2.0
	Set #2	Wire Ø 2.0 ~ Ø 4.0
	Set #3	Bundle ~ Ø 30.0
Temp.(℃)	Range	-40 ℃ ~ 120 ℃

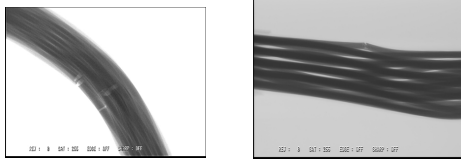


Fig. 2 X-ray examination results for the disconnection in wire(left) and bundle(right)

Table 3 Experimental condition for wire test

Wire	SQ (mm ²)	Jig	Radius of curvature (mm)	Motor speed (pls/sec)
AVSS	0.3	Set # 1	7.5	2500 ~ 5000
	0.5		10	
	0.85		20	
	1.25	Set # 2	30	
	2.0		40	

Table 4 Experimental condition for bundle test

Bundle	Jig	Radius of curvature(mm)	Motor speed (pls/sec)
AVSS 0.85 × 24	Set # 3	40	2000

선 한 가닥이 단선 시 발생하는 전압 강하치는 전압강하 측정 기준치라고 하는 고유한 값을 갖으며 예비 피로시험을 통하여 전압강하 측정 기준치를 구한다. 예비 피로시험으로 얻은 전압강하 측정 기준치를 이용하여 와이어와 번들의 수명 시험을 실시하며 시험 완료 후 X-ray검사와 시험 데이터 검증, 내전압 검사를 통하여 수명을 검증하도록 한다.

와이어 시험은 와이어 하네스를 구성하는 AVSS 와이어 5종으로 시험을 실시하였다. 와이어 SQ(mm²)별로 장착 지그를 달리 하였고 실차 도어 개폐 시 와이어 하네스에 발생하는 거동과 동일한 곡률과 속도를 가하였다.

번들 시험은 번들의 피로 수명 인자를 판단하는 시험이며, AVSS 0.85 SQ 전선 24개로 구성된 번들을 구성 한 후 동일한 곡률반경으로 테이핑조건을 달리하여 시험하였다.

2.2 실차(Assembly level) 조건의 피로시험

실차 시험은 Fig. 3과 같이 다수의 와이어가 모인 번들 상태에 그로맷을 적용하여 실차 조건의 CAE 신뢰성을 검증하기 위해 시행하였다.

그로맷을 통과하는 모든 회로를 직렬 연결하였으며, 1A 통전을 통해 각 와이어가 피로 단절 되었을 때의 전압강하를 측정하여 수명을 평가하도록 하였다. 시험 온도는 상온(23±3℃)에서 분당 15회의 개폐 속도를 적용하였고, 개폐 시 정지 시간을 1초 이상 유지하였다. 실차 조건에 사용된 그로맷 내부의

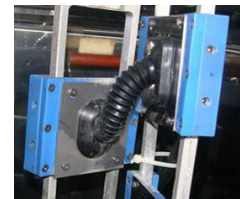


Fig. 3 Experimental set up for assembly level fatigue test

번들은 AVSS 0.85SQ 전선 24개로 구성하였다. 시험 결과로 수명은 약 75만회의 수치를 나타내었다.

3. 해석적 연구

단일 와이어의 경우 가는 구리선을 꼬거나 묶음을 폴리머 튜브로 포장하여 제작된 경우가 많으므로 여러 하중이 작용하는 경우에 이의 기계적 거동을 해석적 혹은 컴퓨터 시뮬레이션으로 예측하는 것은 쉽지 않다. 또한 이를 현 상태의 형상대로 컴퓨터 모델을 구성하여 FEM 등의 해석을 시도하는 것은 소프트웨어적(혹은 이론적)으로는 가능하지만 현재의 하드웨어 성능의 제약으로 가능하지 않다. 따라서 이러한 거동을 예측할 수 있는 계산방법과 컴퓨터 모델을 개발하여 시험적 거동과의 비교를 통해 검증하는 것은 제품거동의 CAE 해석을 위하여 필수적으로 선행되어야 한다. 단일 와이어의 경우 일종의 복합재료(composite material)로 볼 수 있으므로 본 연구에서는 복합재료 해석에 많이 사용되는 등가모델(equivalent model/homogenized model) 기술을 활용하여 단일 와이어 모델을 개발하고 시험을 통하여 검증함으로써 수명에측에 적합한 기술을 Fig. 4의 순서도에 따라서 구축하였다.

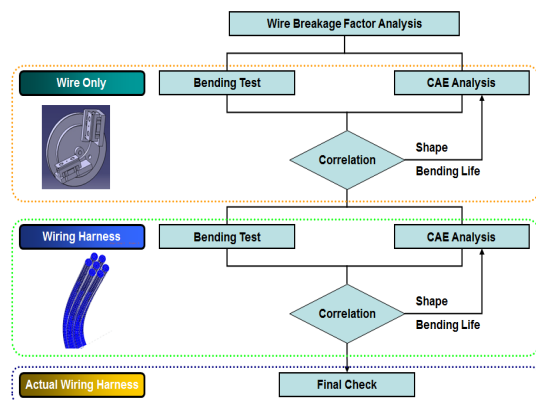


Fig. 4 Flow chart of fatigue test for wire harness

3.1 와이어 등가모델

와이어는 여러개의 도선과 대변형 거동을 하는 피복으로 구성된 복합재료이다. Twist된 도선 내의 소선 모두를 모델로

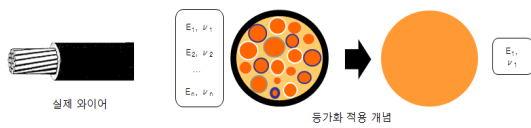


Fig. 5 Schematic view of equivalent wire model

설정하여 해석을 수행하면 많은 시간과 경비가 소요되나, 각 재료의 물성치를 통합된 하나의 물성치로 환산하여 단순화된 모델로 수치적 해석을 시행하면 많은 시간 및 경비를 줄 일수 있다. 본 연구에서는 복잡한 해석 모델의 단순화를 통하여 해석 시간을 단축하는 방안으로 복합재료에서 많이 적용되고 있는 등가화 모델을 적용시켰다. 등가물성은 물성치가 서로 다른 2개 이상의 재료가 동일한 변위 거동을 한다는 조건을 만족한다는 가정에서 도출된 물성치로서 도선과 피복이 동일한 변위거동을 하는 와이어/변들에 적용 가능하다.

등가물성을 얻기 위하여 와이어의 도선과 피복은 탄성영역 내에서 같은 변형률을 가지고 있다는 가정 하에 “Rule of Mixtures” 이론을 적용시킨다. 적용되는 식은 다음과 같다.

$$E_1 = E_s \left(\frac{A_s}{A_t} \right) + E_c \left(\frac{A_c}{A_t} \right) \quad (1a)$$

$$\nu_{12} = \nu_s V_s + \nu_c (1 - V_s), \left(\because V_s = \frac{A_s}{A_t} \right) \quad (1b)$$

$$\rho_1 = \rho_s \left(\frac{A_s}{A_t} \right) + \rho_c \left(\frac{A_c}{A_t} \right) \quad (1c)$$

여기서, A 는 단면적(cross sectional area, m^2), E 는 탄성계수(elastic modulus, Pa), ν 는 포아송 비(poisson's ratio), ρ 는 밀도(density, kg/m^3) c 는 도선(wire core), s 는 피복(sheath), t 는 전체 단면적을 나타낸다.

3.2 와이어 등가모델의 검증

이론적으로 등가화한 모델을 검증하기 위해 실 모델과 등가모델을 같은 조건으로 동일한 크기의 인장력과 곡률을 적용한 해석결과를 비교하였다. 여기서 실물모델은 twist 되어 있는 형상을 심 선 하나로 가정하고 피복(sheath)과 심선(wire core)만으로 분리하여 수행하였으며, Fig. 6의 단일 와이어 인장 변위 해석결과 두 모델의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

곡률 해석 비교를 위해 Fig. 7과 같이 와이어 지그 모델을 이용하여 실제 와이어 굽힘에서 일어나는 변형률을 해석 비교하였다.

각 곡률 반경에서의 변형률 결과 비교를 Table 5에 나타

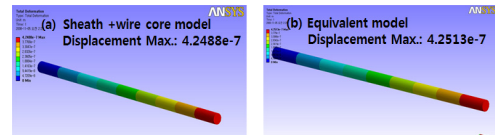


Fig. 6 Verification of the equivalent model by tensile test analysis

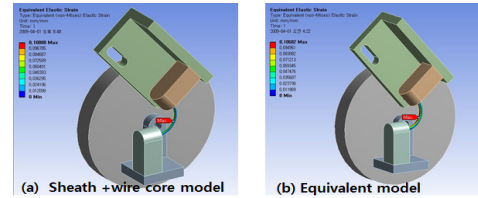


Fig. 7 Verification of the equivalent model by curvature test analysis

Table 5 Curvature test result comparison between equivalent model and real model

Radius of curvature		7.5 (mm)	10.0 (mm)	20.0 (mm)	30.0 (mm)	40.0 (mm)
Max. von-mises strain	Equiv.	0.1279	0.1068	0.0592	0.0395	0.0291
	Real	0.1332	0.1088	0.0597	0.0400	0.0296

내었다. 해석결과를 통하여 최대 변위 및 변형률의 차이가 미비함을 알 수 있었으며, 결과적으로 와이어 거동 해석을 위해 등가모델을 사용하였으며 변들과 실차 해석에 이 모델을 적용하였다.

3.3 와이어 단계의 해석

해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS로 진행하였으며 시험과 동일한 조건의 회전을 일으키는 지그(jig)모델을 적용하였다. 실제 Test 장비와 똑같은 거동을 만들어 주기 위해서 Test 장비에 대한 3D 모델의 회전을 일으키는 중요 치수를 확인하여 지그(jig)모델을 만들어 주었으며, 회전을 일으키는 중요치수는 Fig. 8과 같이 기준 핀과 sub핀 사이의 거리, 와이어의 높이, 와이어의 길이이다. ANSYS에서 불러들인 지그모델은 몇 개의 파트로 이루어져 있다. 해석적 거동을 확인해야 할 와이어를 제외한 나머지 파트는 와이어의 굴곡을 주기 위한 지그이므로 Rigid Body로 설정하였으며, 와이어는 “Rule of Mixtures” 이론을 적용시킨 등가화 물성치를 입력하였다.

해석을 수행할 지그모델은 Assembly 형태이기 때문에 각 파트의 접촉부위를 Fix로 정의해 주고 회전이 일어나는 부분은 실험값과 동일하게 정의하였다. 해석을 통해 얻은 곡률 별 와이어의 응력해석 결과와 실험으로 얻은 와이어의 곡률

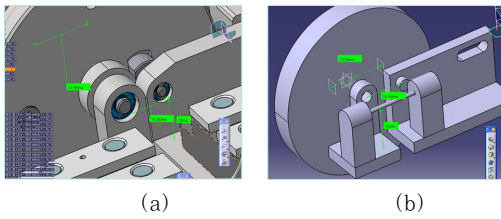


Fig. 8 Zig model for wire analysis using CATIA V5: (a) 3D model for wire test equipment, (b) Wire and jig model for numerical analysis

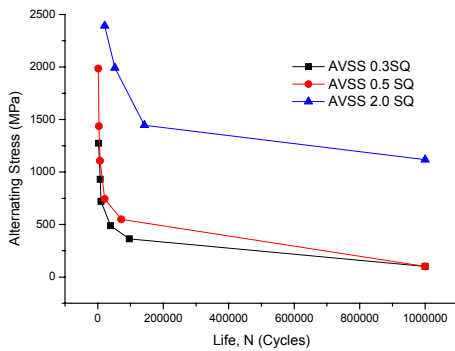


Fig. 9 Stress-life graphs for AVSS wires

별 수명 값을 이용하여 Fig. 9와 같은 각 단일 와이어의 곡률에서 나타나는 응력대비 수명(S-N) 그래프를 얻었다. 와이어의 곡률 값이 크면 와이어에 가해지는 응력이 작으므로 수명이 길어지고 이와 반대로 곡률 값이 작으면 와이어의 응력이 커지므로 수명이 줄어드는 것을 알 수 있다. 각 SQ별 와이어의 응력 대비 수명 데이터는 해석상의 피로물성 값으로 사용 되었다.

3.4 번들 단계의 해석

와이어 지그 모델링과 같은 방법으로 모델링하고 실제 번들과 같이 각각의 와이어는 분리되어 있으며 와이어 간의 접촉조건이 고려되었다.

Fig. 10은 번들 시험 장비의 3D 모델을 수치적 해석 모델로 변화시킨 모습을 나타낸다. 번들 해석은 와이어 해석과 동일한 방법으로 진행할 수 있으나 번들은 24개의 와이어가 한데 뭉쳐져 있는 형상으로 와이어 간의 접촉이 일어나게 된다. 그 결과 실제 테스트에서는 굴곡을 뒀을 때 중간 부분이 퍼지는 현상이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 현상을 구현하기 위해서 Fig. 11과 같이 굴곡이 심하게 일어날 수 있는 부위에 가상의 surface를 만들어 각각의 와이어 파트와 강제구속을 시켜 준 후, surface에 접촉조건을 부여하였다.

번들 제작 시 테이핑의 위치에 따른 번들의 거동 특성을 파악하였다. 테이핑 위치의 종류는 크게 네 가지로 분류할

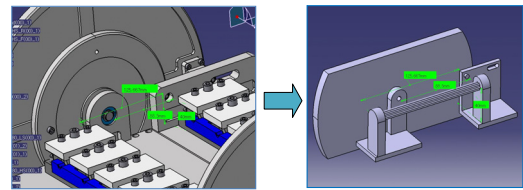


Fig. 10 Jig model for bundle analysis using CATIA V5

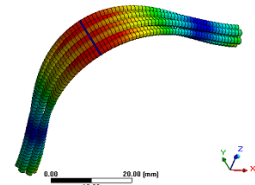


Fig. 11 Wire contact effect simulation in the bundle analysis

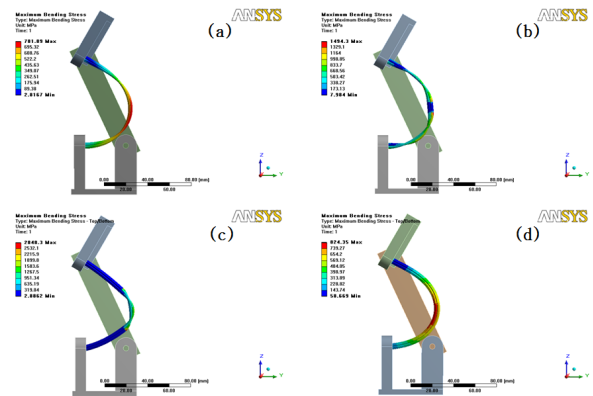


Fig. 12 Bundle analysis on the effect of taping conditions: (a) Free condition (No taping), (b) Middle taping condition, (c) Both end taping condition, (d) All taping condition

수 있으며 Fig. 12와 같이 자유조건, 중간부분 테이핑조건, 양단부분 테이핑조건, 전체 테이핑조건을 접촉조건을 이용하여 부여하였다.

이 때, 특정부분에서의 테이핑 접촉조건을 부여하기 위하여 3차원 CAD 모델링 시 바디를 나누어 ANSYS에서 모델을 임포트 했을 때 서로 다른 바디로 인식하도록 하였고 접촉조건 종류는 Bonded로 정의하였다.

해석 결과는 위의 그림과 같이 요약될 수 있다. 모두 네 가지의 테이핑조건을 통하여 해석을 진행한 결과 양단 부분 테이핑의 조건에서 응력집중이 최대가 되는 것을 알 수 있었고, 그 이유는 거동 양상만으로도 판단이 가능하였는데, 번들에 테이핑을 했을 경우 강성이 높아지면서 굴곡 조건 하에서 변형이 적게 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 비교적 강성이 작은(테이핑 되지 않은) 부분에서 심한 변형을 일으키며 응력이 집중되는 것으로 파악되었다. 그렇기 때문에 테이핑을 하지 않은 자유조건과 번들 전체 테이핑을 했을 때

Table 6 Analysis results of bundle taping conditions

	Free	Both ends	Middle	Overall
Max. Stress (MPa)	3.45	10.32	7.54	3.86

의 응력 분포는 비슷하였으며 Table 6과 같이 그 수치 또한 크지 않은 차이를 가진 것으로 파악되었다.

3.5 실차(Assembly) 단계의 해석

와이어 레벨에서 축적된 와이어의 응력-수명 데이터를 적용하였으며, 실차 조건에서 그로맷 내부의 와이어 번들이 도어가 열리고 닫히는 작동 사이클에서 응력 해석과 피로 해석을 수행하였다. 응력해석에는 비선형 정적해석이 적용되었다. 모델은 Fig. 13(a)와 같이 실차 조건에 부합하는 형상정보를 그대로 이용했고, Fig. 13(b)와 같이 내부의 와이어 번들을 각각의 바디로 모델링하였다.

실차 도어 개폐조건과 같은 운동을 구현하기 위하여 Fig. 14(a)의 도어 힌지 라인의 경계조건을 부여하였으며, Fig.

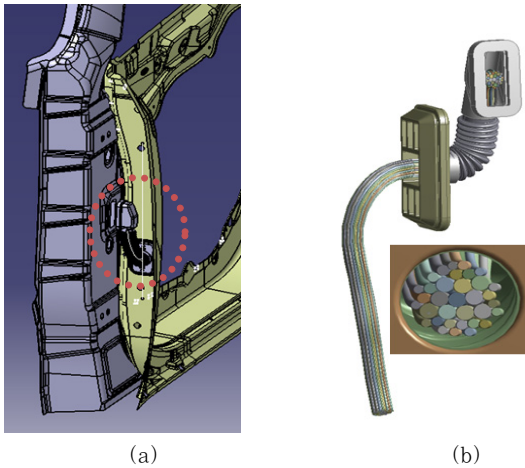


Fig. 13 Grommet and wire bundle model: (a) CATIA 3D model for door and wire harness, (b) Reformed 3D model for numerical analysis

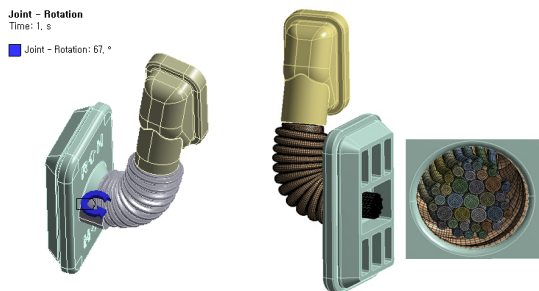


Fig. 14 (a) Operated boundary condition of the wire harness, (b) Finite element model for wire bundle and grommet

14(b)와 같이 유한요소모델을 형성하였다.

실차 단계에서의 응력해석 결과는 Fig. 15와 같이 나타난다. 와이어와 그로맷의 응력 범위가 다른 관계로 따로 나타내었다.

경계조건이 부여된 부분의 응력집중을 배제하고 최대 응력이 발생하는 부분을 찾아보기 위해 다음 Fig. 16과 같이 방향별로 살펴보았다.

응력의 분포 양상을 분석해 본 결과 와이어에 작용하는 스트레스는 그로맷이 작동하면서 생기는 굽힘과 비틀림에 의한 응력이 지배적이었고, 때때로 테이핑이 요구되는 그로맷의 경우에는 테이핑으로 인한 와이어의 인장응력이 나타났다.

본 피로수명 해석결과를 전적으로 와이어 레벨에서 구해진 곡률-수명 시험에 의존한다. Fig. 17에 나타난 것과 같이 실차 조건 피로수명 해석결과에 따르면 와이어 하네스의 예상 수명은 약 70만회에 이른다. 실차 시험에서 얻은 측정치와

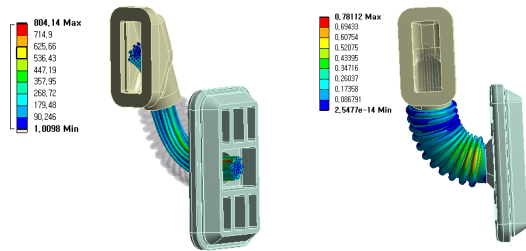


Fig. 15 The von-Mises stress distribution

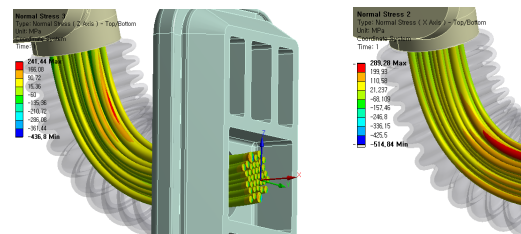


Fig. 16 Directional Cauchy stress: (a) Z-direction, (b) X- direction(normal to plane)

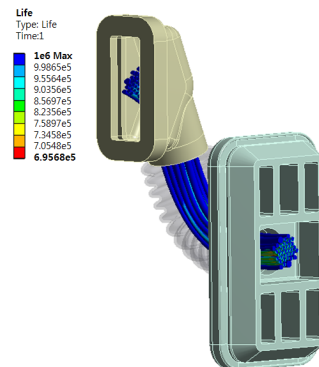


Fig. 17 Expected life cycle at specific cross-section

비슷한 결과를 보였으며, 하루에 약 100번 도어를 여닫는다고 가정하면 1년에 36,500회, 10년이면 365,000회에 도달하고 결과적으로 약 19년 정도 수명을 보장한다고 볼 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 하네스의 피로내구를 평가하기 위하여 상용 프로그램을 이용해 수치 해석적 방법을 개발하였고 필요한 물성 데이터의 확보와 해석의 검증을 위해 시험기기의 개발과 실험적 방법을 병행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 와이어의 S-N(응력 대비 수명) 경향은 일반적인 재료의 피로선도와 유사하며 곡률(응력)과 수명은 반비례 관계에 있다. 각 SQ별 와이어의 피로수명 데이터는 본 연구를 통해 개발된 시험기기를 통해 얻어내었다.
- 2) 시험과 해석을 통해 얻어진 응력-수명(S-N) 그래프는 하네스 해석에 적용되었으며 그 타당성이 실험적으로 검증되었다.
- 3) 번들의 테이핑조건이 해석상에서 번들 모델로 구현되어 하네스 시스템에서의 테이핑 효과에 대한 해석방법론이 정립되었다.
- 4) 실차조건에서 적용되는 외력조건과 와이어 간의 접촉 조건, 곡률변화, 테이핑 등의 변수가 적용되어 해석이 수행되었으며, 이를 통해 실차조건의 피로수명 해석 방안이 정립되었다.

참 고 문 헌

- Cha, J.H., Ku, N.K., Roh, M.I., Lee, K.Y. (2012) Dynamic Simulation of a Shipbuilding Erection Crane based on Wire Rope Dynamics, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 25(2), pp.119
- Cheon, H.J., Cho, J.R., Yang, H.J., Lee S.B. (2011) Fatigue Life Prediction of Medical Lift Column utilizing Finite Element Analysis, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 24(3), pp.337
- Frost, Sullivan. (2006) Analysis of European Automotive Wiring Harness and Connectors Markets, *Market Research Reports*.
- Kim, B.S., Lee, K. (2007) Life Prediction Analysis of Wiring Harness System for Automotive Vehicle, *Internal report of Hoseo University 2007*.
- Kim, B.S., Lee, K., Park, K., Chaabane, S.B. (2008) Large-Deflection Analysis of Automotive Vehicle's Door Wiring Harness System Using Finite Element Method, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 23, pp.420~424.
- Kim, B.S., Kang, K., Park, K., Noh, K.D. (2010) Life Prediction of Automotive Vehicle's W/H System Using Finite Element Analysis, *Transactions of KSAE*, 18, 1, pp.139~144.
- Lakshmi, B., William, N.G., Bhatia S.A. (2006) Non-linear Finite Element Analysis of Typical Wiring Harness Connector and Terminal Assembly Using ABAQUS /CAE and ABAQUS/Standard, *2006 ABAQUS users' conference*, 1, pp.345~357.

요 지

본 논문에서는 와이어 하네스의 피로 내구 수명을 예측하기 위해 와이어, 번들, 실차단계의 유한요소 해석 방법론이 연구되었고 이를 위한 피로 내구 시험 기기가 개발되었다. 와이어 하네스 시스템을 구성하는 5가지 종류의 와이어에 대한 응력-수명 그래프를 얻기 위해 개발된 피로 시험기를 이용하여 반복 굽힘 움직임을 인가하였다. 와이어를 구성하는 도선과 피복의 재료 모델링을 위해 혼합의 법칙이 적용된 등가모델을 이용하였다. 번들 해석과 시험을 통하여 와이어 간의 접촉조건과 번들의 테이핑조건이 정립되었다. 와이어 및 번들 단계의 결과들은 실차 단계의 해석에 적용되었다. 실차단계의 해석을 위해 번들과 그로맷으로 구성된 와이어 하네스 시스템을 수치적으로 모델링 하였으며, 차량 문의 개폐조건이 와이어 간의 접촉조건과 함께 적용되었다. 유한요소 해석을 이용한 실차 모델의 피로 내구 해석을 통해 70만회 이상의 피로 수명이 도출 되었으며, 실차 조건의 시험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

핵심용어 : 피로내구, 와이어 하네스, 등가모델, 와이어모델, 번들모델, 실차모델