

와이어 하네스의 압착공정에서 설계변수가 압축률에 미치는 영향 연구

구선모¹ · 최현순² · 김영석[#]

Effects of Design Variables on Compression Rate of Wire in Connector Crimping Process of Wire Harness Using FEM

S. M. Gu, H. S. Choi, Y. S. Kim

(Received May 10, 2010 / Revised July 2, 2010 / Accepted July 19, 2010)

Abstract

Recently industry of motor vehicle is making a gradual progress of automotive electric components. According to this step, wire harness equipped at motor vehicle is also increased. The most important component at the wire harness is electric connector. At the manufacturing process of electric connector, exactly at the crimping process, design variables, such as clamping-height, clamping-width and clamping die shape are critical parameters to assure satisfactory harness shape in clamping process of electric connector. In this study we have performed FEM simulation for clamping process and clarified the effect of design variables on compression rate of wire.

Key Words : Electrical Connector, Terminal Crimping, Finite Element Analysis, Experimental Design Method, Taguchi Orthogonal Array

1. 서 론

최근 자동차에서 전장품(automotive electronics)이 차지하고 있는 비중은 점차 늘어가고 있다. 이는 환경오염 방지를 위한 자동차 배기가스, 유한한 지구 자원의 효율적 사용을 위한 연료 경제성 및 승객의 보호를 위한 안전 등에 대한 범국가적 차원에서의 법적 규제의 강화 추세이다. 자동차의 전자화는 전장시스템의 종류와 기능을 다양화시켜 주고 있으며 또한 배선 연결 개수가 증가함에 의해 더 높은 신뢰성을 요구하게 된다. 따라서 전장시스템의 한 부분인 전기 커넥터(electrical connector)의 역할도 점점 비중이 높아가고 있다.[1] 이러한 필요에 따라 현재 차량에 사용되는 와이어 하네스(wire harness) 무게는 평균 25kg~30kg

이며 그 중에서 와이어의 무게가 약 8~15kg 정도를 차지한다. 특히 SUV 경우에 와이어 하네스 무게는 약 40kg정도이며 1500개의 와이어(wire)와 2000개의 터미널(terminal)이 사용되고 있는 것으로 보고되고 있다.

이와 같이 전장품의 증가는 차량 전자장치에 전원 공급 및 데이터 전송을 위해 사용되는 와이어를 증가 시키며, 증가된 와이어 중량은 자동차 중량을 증가시켜 차량의 연비를 떨어뜨린다. 또한 늘어난 와이어 배선은 와이어 하네스의 회로망을 복잡하게 만든다. 이러한 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 와이어 및 전기 커넥터가 점차 소형화되고 있는 추세이다.

전기 커넥터는 터미널과 와이어의 압착 공정의 해 생산되고 있다.

1. 경북대학교 기계공학과 대학원

2. ㈜THN 기술연구소

교신저자: 경북대학교 기계공학부 E-mail: caekim@knu.ac.kr

대표적인 터미널 및 전기 커넥터 형상을 Fig. 1 에 나타내었다. 전원공급 및 데이터 전송을 담당하는 와이어 하네스 제조 업체에서는 와이어의 불량 현상을 줄이기 위해 와이어 각각의 크기, 와이어와 커넥터 압착 공정에서의 압축률, 주위환경의 온도 그리고 습도 등과 같은 다양하고 가혹한 사용 조건하에서 와이어 하네스의 저항변화가 작은 품질의 제품을 제조하기 위해 노력하고 있다.

지금까지의 터미널 압착 공정에서는 와이어 압착 성형공정의 유한요소 해석 가능성 여부 및 하중 변위의 예측을 통한 가공기의 설계 등에 관한 연구가 주 이었으나[2] 펀치형상, 터미널 형상 그리고 펀치행정 등과 같은 공정설계변수(process design variables)에 관한 연구는 보고된 바가 적다.

이에 본 연구에서는 기존의 터미널 압착 기술을 바탕으로[3~10] 극세 전선으로 알려진 0.13SQ 와이어 하네스를 대상으로 압착공정에서 각각의 설계변수가 압축률 만족에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 터미널 및 압착 공구에 대한 모델설계는 CATIA V5R16을 이용하였고 ABAQUS V6.5를 이용하여 압착공정 해석을 수행하였다.

그리고 압착 공정 해석 결과를 다구찌 실험계획법(Taguchi experimental design method)을 이용하여 최적의 공정설계변수를 도출하였다. 다구찌 실험계획법은 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 주요 인자를 선정하고, 이들의 관계를 알아보기 위한 직교 배열(orthogonal array)에 따른 실험을 실시하여, 실험데이터를 평균분석 및 분산분석하여 올바른 행동방안 즉, 제품의 최적 제조 및 관리방안을 경제적으로 찾는 것이다. 이에 다구찌 실험계획법은 본 연구에서 추구하는 압축률에 미치는 최적의 변수를 도출하는데 적합하다고 생각된다.

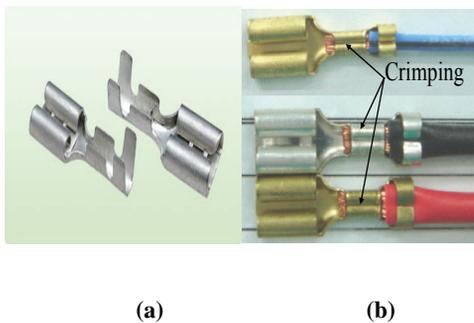


Fig. 1 (a) Terminals and (b) Electrical connectors

2. 전기 커넥터의 압착 공정

압착 공정 공구는 크게 Fig. 2 와 같이 터미널 압착 공구 펀치와 터미널을 지지해주는 고정 다이로 구성되어 있다

터미널과 와이어 압착 공정을 간단히 설명하면 고정 다이 위에 터미널이 있고 “U”형상의 터미널 안에 와이어가 위치해 있다. 그리고 하강하는 펀치에 의해 터미널이 와이어를 감싸면서 최종적으로 터미널이 옆으로 누운 “B”형상을 이루며 압착이 완성된다. 본 연구에서 사용된 와이어 형상 모델 및 설계치수를 Table 1 에 나타내었다. 실제 현장에서 원하는 “B”형상은 압축률(compression rate)이 약 75%에서 85%사이를 양품으로 취급한다.[8] 특히 80%의 압축률이 가장 이상적인 수치로 보는데 그 이유는 80%일 때 터미널의 사용환경에서의 저항변화가 가장 적어 제품의 품질 불량률이 낮아지기 때문이다.

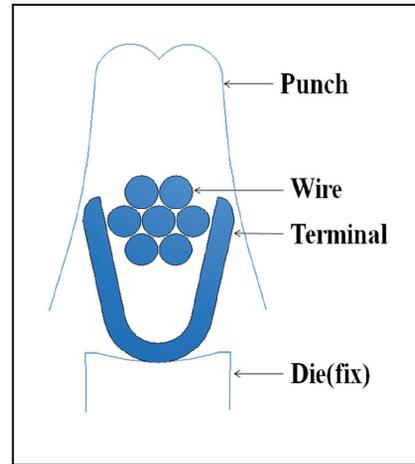


Fig. 2 2D view of the crimped part of an electric connector

Table 1 Description of the wires

Model	Number of wires	Radius of each wire(mm)	Area (mm ²)
0.13SQ	7	0.077	0.13

3. 전기 커넥터 압착공정의 유한요소해석

3.1 다구찌 실험계획법의 이용

고품질 제품을 만들기 위한 가장 중요한 변수로는 Table 2와 같이 3개의 공정변수인 편치 반지름(R), 편치가 수직으로 내려오는 편치 행정(H), 터미널 내부 길이(L)을 택하였고 각각에 대해서 3 수준으로 변화를 주었으며 Table 3과 같이 직교배열표를 작성하였다. 터미널 내부길이는 문헌 [2]에 제시된 바와 같이 와이어들의 묶음을 하나의 와이어로 간주하여 80%의 압축률일 때의 원주길이를 기준으로 결정하였다. 편치 반지름이 이루는 각은 145°로 고정하였다. 각 인자에 대한 정의를 Fig. 3 에 나타내었다.

Table 2 Level of process parameters

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
L (mm)	2.23	2.13	2.03
R (mm)	0.20	0.19	0.18
H(mm)	1.58	1.60	1.62

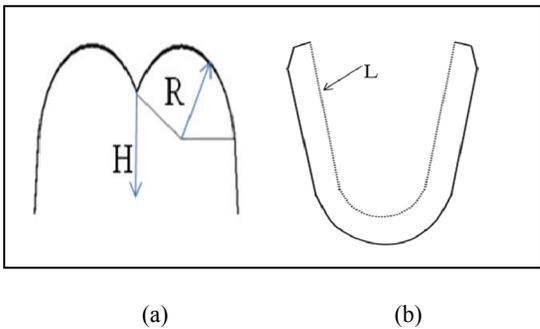


Fig. 3 2D views of the crimped part of an electric connector

Table 3 L₉ (3³) orthogonal array for FE simulation

Simulation	A(L)	B(R)	C(H)
1	1(2.23)	1(0.20)	1(1.58)
2	1(2.23)	2(0.19)	2(1.60)
3	1(2.23)	3(0.18)	3(1.62)
4	2(2.13)	1(0.20)	2(1.60)
5	2(2.13)	2(0.19)	3(1.62)
6	2(2.13)	3(0.18)	1(1.58)
7	3(2.03)	1(0.20)	3(1.62)
8	3(2.03)	2(0.19)	1(1.58)
9	3(2.03)	3(0.18)	2(1.60)

3.2 품질특성과 최소화할 목적함수의 선정
터미널 압착 성형 후 터미널 내부 와이어의 압축률은 80%에 가까울수록 좋으므로 다구찌 기법에서 망소특성(smaller-the-better)인 문제가 되며 식 (1)의 손실함수를 적용하여 S/N 비(signal-to-noise ratio)을 비교하여 최적의 수준을 도출하였다.

$$\eta_i(\text{dB}) = -10\log_{10}(\Delta A)^2 \quad (1)$$

여기서 ΔA 는 해석에서 계산한 단면 감소율과 이상적인 단면 압축률인 80%와의 차이를 나타낸다.

3.3 유한요소해석 모델

전기 커넥터의 터미널, 와이어 압착 공정 해석은 ABAQUS Version 6.5 및 6.8 Explicit를 이용하여 해석하였다. 해석은 계산시간을 고려하여 2차원 평면변형문제로 해석을 수행하였다. 터미널과 와이어의 재료는 각각 황동과 구리이다. 모두 등방성이며 본 미세스 항복조건을 따르는 것으로 가정하였다. 황동과 구리 재료의 인장특성을 Fig. 4 에 나타내었다. 터미널 두께는 0.12mm로 하였으며 편치와 다이는 강체(rigid body)로 가정하였다.

본 해석에서 접촉처리는 해석 결과에 중요한 역할을 한다

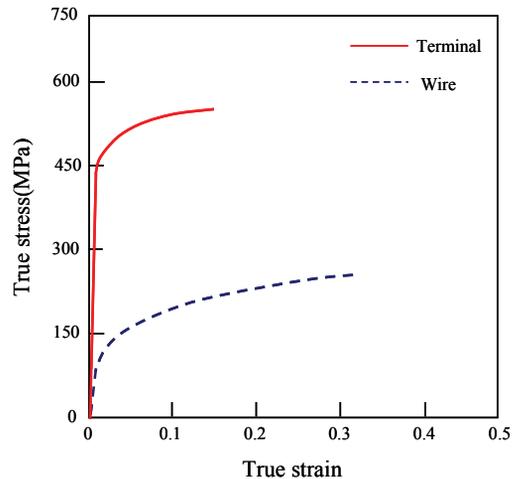


Fig. 4 Stress-strain curve from tensile test

기존의 연구결과를 바탕으로 터미널과 와이어의 접촉, 편치와 와이어의 접촉, 터미널과 편치의 접촉, 터미널의 자가접촉(self contacting), 다이와 터미널의 접촉 그리고 편치와 다이의 접촉에서

마찰계수는 0.15로 하였으며, 와이어와 와이어 사이의 접촉에서 마찰계수는 0.1로 설정하였다. 해석에 사용된 입력값을 Table 4 에 나타내었다.

Table 4 Parameters used in simulation

	Terminal	Punch&Die	Wire
Poisson's ratio	0.3	Rigid body	0.3
Density (Kg/m ³)	8530	Rigid body	8960
Friction coefficient	0.15	0.15	0.1

4. 해석 결과 및 고찰

각 경우에 수행된 터미널 압축률로부터 망소특성 문제에 대해 계산한 결과를 Table 5 에 나타내었다.

Table 5 Comparison of SN ratio for harness crimping process

Simulation number	△A	η(dB)
1	3.85	-11.7
2	18.47	-25.32
3	25.4	-28.09
4	9.3	-19.36
5	17.7	-24.95
6	13	-22.27
7	12.3	-21.79
8	4.6	-13.25
9	13.9	-22.86

분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)의 결과를 Table 6 에 나타내었다. 각각의 인자에 대해 3 수준으로 결정되는 제곱합(Sum of square)은 식 (2)에 의해 계산된다.

$$3(m_{j1}-1)^2 + 3(m_{j2}-m)^2 + 3(m_{j3}-m)^2 \quad (2)$$

여기서 m 은 $m=1/9 \sum \eta_i = -21.06(\text{dB})$ 정의되는 9 회 해석결과로부터 계산되는 η_i 의 평균값이 되고 $m_{ji} = 1/3 \sum (\eta_{ji})_i$ 로 주어지며, j 인자에 대해 i 수준(i=1,2,3)에서의 평균 η 값이다. Table 6 의 분산분석 결과로부터 C 인자(펀치 행정)는 전체 제곱합(total sum of square)에 대하여 59%의 영향을 미치고 A

인자(내부 길이)와 B 인자(펀치 반지름)는 각각 6%, 34%의 영향을 미친다. 이와 같이 분산분석을 하는 목적은 목적함수에 미치는 각 인자의 영향에 대한 상대적 크기를 결정하고 오차를 고려하여 그 정도를 평가하는데 있다. 상기 분석 결과, 최적인자의 조합은 A₃B₁C₁, 즉 내부 길이는 2.03mm, 펀치 반지름은 0.20mm 그리고 펀치 행정은 1.58mm 임을 알 수 있다.

Table 6 ANOVA analyses for harness crimping process

Factor	Average η by Level			Sum of squares	Contribution
	1	2	3		
A(L)	-21.7	-22.19	- 19.3*	14.38	0.0627
B(R)	- 17.6*	-19.31	- 24.40	78.41	0.3420
C(H)	- 15.7*	-22.51	- 24.94	136.48	0.5952
Total				229.29	

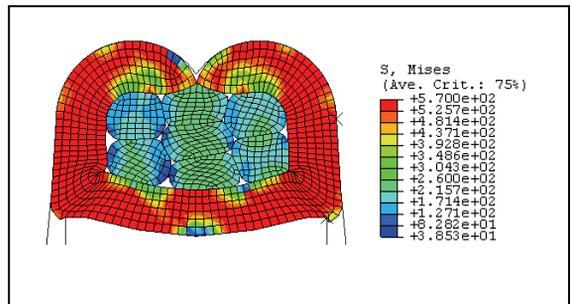


Fig. 5 Deformed shape and Mises stress of the bracket and wires in 2D FEM simulation

Fig. 5 에 A₃B₁C₁ 경우의 해석에서 구한 와이어의 변형 형상과 응력분포를 나타내었다. 이 경우의 압축률은 79.2%이며 이는 본 연구에서 최적화된 설계변수가 타당함을 알 수 있다.

Fig. 6 에 비교를 위해 터미널의 압착공정의 3 차원 유한요소해석 결과로부터, 길이 방향으로 왼쪽 끝단 위치(x=0.1mm), 중간위치(x=0.5mm) 그리고 오른쪽 끝단 위치(x=0.9mm)에서의 응력분포를 나타내었다.

3 차원 해석에는 C3D8R 고체요소를 사용하였다.

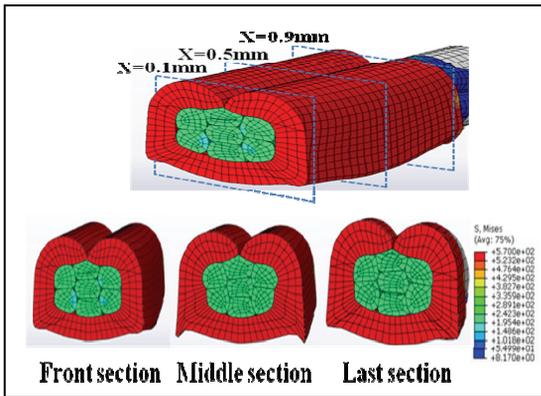


Fig. 6 Deformed shape and Mises stress of the wires at each section in 3D FEM simulation

Fig. 5 과 Fig. 6 해석결과를 비교하면, 최대 응력은 570Mpa 이며 2D 해석 및 3D 해석에서의 응력 분포가 비슷한 경향을 보인다. 2 차원 해석과 3 차원 해석에 소요된 해석시간은 각각 약 10 분, 10 시간이었다. 따라서 터미널의 압착공정의 해석에 있어서 계산이 많이 소요되는 3 차원 해석 대신에 2 차원 해석을 이용하는 것이 공정변수의 최적화 및 관련 정보의 파악에 유익하다고 볼 수 있다.

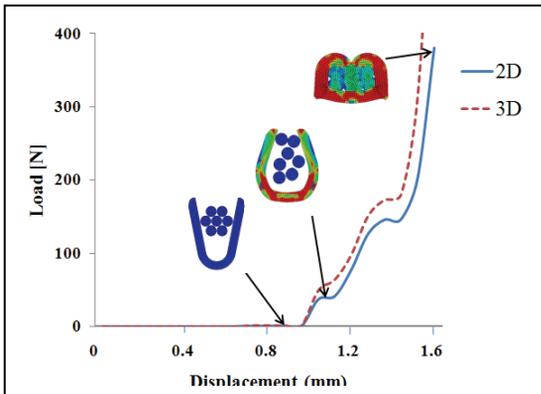


Fig. 7 Comparison of punch load-displacement curves and deformed shape of wires at punch displacement of 0.9mm, 1.1mm and 1.6mm, respectively.

Fig. 7 에 2 차원 해석과 3 차원 해석에서의 펀치 하중과 변위 관계를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 터미널 압착에는 최대 400N 의 하중이 요구되며 2D 해석 및 3D 해석에서 그래프 경향이 비슷함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 전기 커넥터로 사용되고 있는 0.13SQ 와이어 하네스의 터미널 압착 공정에서 설계변수가 압축물에 미치는 영향을 검토하기 위하여 다구찌 기법을 이용한 유한요소해석을 수행하였다.

(1) 다구찌 기법을 적용한 결과, 설계변수 중 펀치 행정이 다른 변수와 비교하여 와이어 하네스의 압축물에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

(2) 와이어 하네스의 터미널 압착 공정에 대한 유한요소해석 결과, 공정변수가 $A_3B_1C_1$ 에서 압축률이 최적화 되었다. 즉 내부 길이는 2.03mm, 펀치 반지름은 0.20mm 그리고 펀치 행정은 1.58mm 에서 이상적인 압축률 80%에 근접하는 것을 알 수 있었다.

(3) 와이어 하네스의 터미널 압착 공정의 설계에 있어서 계산 효율을 고려하면 2D 유한요소해석이 유익하였다.

후 기

본 연구는 ㈜THN 기술연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] N.K. Cho, 2008, Electronic trends required & sensors prospect of automotive systems, J. Korean Soc. Auto. Engineers, Vol. 30, No. 3, pp. 36~41.
- [2] Z.H. Yin, J.G. Park, H.S. Choi, and Y.S. Kim, 2009, Quality improvement for crimping process of electrical connector using FEM analysis, Trans. Mater. Proc., Vol.18, No.2, pp. 229~236.
- [3] Y.S. Kim and Z.H. Yin, 2008, FEM simulation of connector manufacturing process, Internal Report, THN Co., Ltd., pp. 6~8.
- [4] T. Morita, Y. Saitoh and M. Takahashi, 1996, Number model of crimping by finite element method, IEEE Holm, pp. 151~155.
- [5] G. Villeneuve, D. Kulkarni, P. Bastnage and D. Berry, 1996, Dynamic finite element analysis simulation of the terminal crimping process, IEEE Holm, pp. 156~171.

- [6] S. Kugener, 1995, Simulation of the crimping process by implicit and explicit finite element methods, AMP J. Technol., Vol. 4, pp. 8~15.
- [7] J. J. Schindler, R. T. Axon, and R. S. Timsit, 1996, Mechanical and electrical contact properties of wedge connectors, IEEE Trans. Components packaging and manufacturing Technol., Vol. 19, pp. 287~294.
- [8] Engineering standard of crimping process, Hyundai · Kia Motor Co., Ltd, ES91101-00.
- [9] G.G. Weber and A.N. Zava Plangos, 1990, An objective time integration procedure for isotropic rate-independent elastic-constitutive equations, Int. J. Plasticity, Vol. 6, pp. 701~ 749.
- [10] Korea Electric Terminal Co., Ltd., 2007, Terminal design standard, Internal Report