

유한요소해석을 통한 전기 커넥터의 압착 품질 향상

윤철호¹ · 박진기¹ · 최현순² · 김영석[#]

Quality Improvement for Crimping Process of Electrical Connector Using FEM Analysis

Z. H. Yin, J. G. Park, H. S. Choi, Y. S. Kim

(Received December 17, 2008)

Abstract

This paper covers finite element simulations to evaluate the terminal crimping process of automobile electrical connector. Crimping is a classical technology process to ensure the electrical and the mechanical link between a wire and a terminal. Numerical modeling of the process is helpful to choose and to optimize the dimensions of the crimping part of the connector. In this paper, we discuss a 2D simulation of the crimping process, using explicit finite element methods (ABAQUS/Explicit) and we compare the results with experimental data from the industrial process of crimping (crimping height, crimping width and compressibility). The explicit method is preferred for the modeling of multi-contact problems, in spite of the quasi-static process of crimping. As compared with CAE analysis, a performance improvement makes certain of the truth of the matter.

Key Words: Electrical Connector, Terminal Crimping, Finite Element Analysis, Plane Stress, Compressibility

1. 서 론

최근 자동차에서 전자제품(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 전자시스템의 종류와 기능을 다양화시켜 주고 있으며 또한 배선 연결 개수가 증가함에 의해 더 높은 신뢰성을 요구하게 된다. 따라서 전자시스템의 한 부분인 전기 커넥터(electrical connector)의 역할도 점점 비중이 높아가고 있다. 자동차용 전기 커넥터는 와이어링 하네스(wiring

harness)에 장착되어 전원공급과 각종 전기신호 전달 및 분배역할을 하며 전자 UNIT 의 결합용으로 사용된다. 전기 커넥터의 양호는 자동차의 품질, 신뢰성, 편의성 및 안전성에 대하여 큰 영향을 미친다[1].

전기 커넥터는 터미널(terminal)과 와이어(wire)를 이용한 압착 공정에 의해 생산되고 있다. 제조업체에서는 전기 커넥터를 생산 후 압착 성형 검사와 실제 사용환경을 재현한 열 충격 및 온, 습도 실험을 수행하고 실험 전, 후의 저항변화를 측정한다. 전수검사를 통해 저항변화가 특히 열 충격 실험에서의 저항변화가 $0.33m\Omega$ 이내의 제품만이 출하된다. 열 충격 및 온, 습도실험조건은 Fig. 1에 나타내었다.

1. 경북대학교 기계공학과 대학원

2. ㈜티에이치엔 기술연구소

교신저자: 경북대학교 기계공학부,

E-mail: caekim@knu.ac.kr

이상적인 압착 형상인 “B”형상제품으로 성형하는 것과 압착 공정에서 압착 관련 규격을 만족하는 압착 높이(crimping height), 압착 폭(crimping width), 압축률(compressibility)을 설정하는 것이 전기 커넥터의 전기, 기계적 성능 및 내구성을 향상시키는 데 중요한 요인으로 지적되고 있다[2].

대표적인 전기 커넥터의 터미널, 와이어 압착 제품 형상을 Fig. 2 에 나타내었다.

전기 커넥터 압착 공정에서 터미널 형상 및 압축률 만족 위한 압착 높이는 현장작업자의 경험에 의존하여 설계되었다. 경험에 의한 제품설계는 압착 후 압축률 규격 불만족, 저항 변화 과다 등 불량률을 유발하게 된다[3]. 이러한 불량은 전기 커넥터 전기적 성능에 영향을 미치게 되는데 향후 자동차 주행 시 엔진 및 각종 전기제어 센서 작용에 큰 영향을 미친다.

지금까지의 터미널 압착 공정 연구들은 단지 터미널과 와이어 압착 성형 성 및 압착 형상에 대한 연구들이었으며[4~9], 규격 압축률 및 실제 사용환경 중 규격 저항변화를 고려한 압착 공정 기술은 보고된 바가 적다. 자동차 운전 시 전기 커넥터는 주위 환경 온도의 변화에 따라서 저항이 변화하게 된다. 전기 커넥터 저항은 피복을 가진 순수 와이어 저항과 터미널, 와이어 사이의 접촉저항으로 나누어 볼 수 있다. 순수 와이어 저항은 열 충격 및 온, 습도 실험에서 저항 변화가 거의 없는 것으로 측정되었다. 그러나 터미널, 와이어 사이의 접촉저항은 온도의 변화에 따라서 변화하는 것으로 측정되었다. 따라서 전기 커넥터 압착 부 접촉 저항 변화를 변화치 규격 이내에 정밀하게 제어하여야 한다. 또한 접촉 저항을 반영한 압착 폭, 압착 높이, 압축률 등 성형 공정 변수들이 정확하게 설정되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 문제점에 입각하여 전기 커넥터 터미널 압착 성형 시 압착 관련 규격을 만족하기 위한 최적조건을 찾고자 한다. 이를 위해 자동차에 사용되는 에어백(air bag) 용 전기 커넥터를 대상으로 터미널 설계치수를 이론적으로 도출하였고, 또한 커넥터의 압착 공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 압착 규격을 만족하는 압착 높이, 압착 폭을 도출하였다. 터미널 및 압착 공구에 대한 모델 설계는 CATIA V5R16 를 이용하였고 CAE 프로그램인 ABAQUS V6.5 를 이용하여 압착 공정 해석을 수행하였다. 해석 모델은 전기 커넥터 2D 모델이

용하여 실제 압착 공정을 고려한 평면응력조건으로 해석을 실시하였다. 또한 해석결과의 검증을 위한 전기 커넥터 단면 형상 측정 실험을 수행하였고, 압착 후 전기 커넥터의 저항 변화, 열 충격 실험 및 온, 습도 실험 후 전기 커넥터의 저항 변화를 측정하였다.

2. 전기 커넥터 압착 공정

2.1 터미널, 와이어 압착 공정

전기 커넥터의 터미널, 와이어 압착 공정 공구는 Fig. 3 과 같이 터미널 압착 공구 편치와 터미널을 지지해주는 고정 다이로 구성되어 있다. 터미널과 와이어 압착 공정을 간단히 설명하면 먼저 터미널을 “U”형상으로 압착을 한 다음에 터미널 양쪽 두 날개가 하강하는 편치에 의해 와이어를 안쪽으로 감싸면서 “B”형상으로 압착을 진행한다. 본 연구에서 사용된 와이어 모델 및 설계치수를 Table 1 에 나타내었다. 와이어 개수와 치수는 자동차업체에서 규정한 전기전류 및 전압 값에 의해 결정된다.

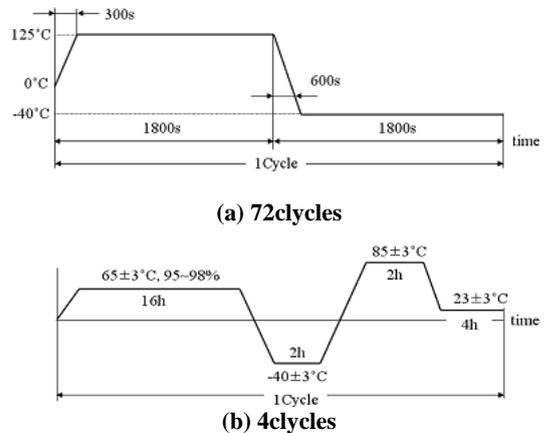


Fig. 1 (a) Thermal impact test and (b) humidity test



Fig. 2 Terminal system of electrical connectors

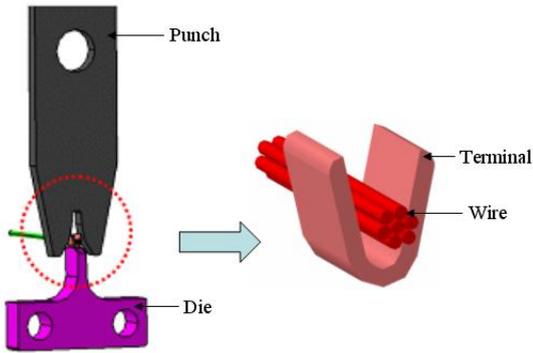


Fig. 3 3Dview of the crimped part of an electric connector

Table 1 Description of the wires

Model	Number of wires	Radius of wires (mm)	Area (mm ²)
AVSS2.0	37	0.13	1.9644

3. 이론적 계산

3.1 터미널 내면 길이 이론적 계산

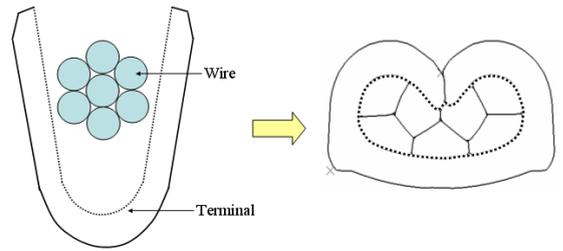
압착 공정에서 와이어 치수 및 개수가 결정된 후 터미널 형상 치수가 설계된다. 결정된 와이어 모델에 대응하는 터미널 모델을 설계함에 있어서 가장 중요한 것은 터미널 내면 길이를 설정하는 것이다. 이는 압착 후 단면 형상이 "B"형상을 유지하는 것과 밀접한 관계가 있다[10].

터미널 형상 및 압착 후 실제단면 형상을 Fig. 4(a)에 나타내었다. 그림에서 점선은 터미널 내면 길이를 나타낸다. 압착 후 단면 형상은 "B"형상을 보이고 있다. 터미널 설계에서 변경이 가능한 터미널 내면 길이의 이론적 계산을 위하여 압착 전, 후 터미널 두께 변화가 없다고 가정하였으며, 압착 후 단면 형상을 원형으로 가정하였다. 압착 후 터미널, 와이어 단면 형상을 Fig. 4(b)에 나타내었다. 가정 형상에서 압착 후 단면 형상은 원형 "O"형상을 보이고 있다.

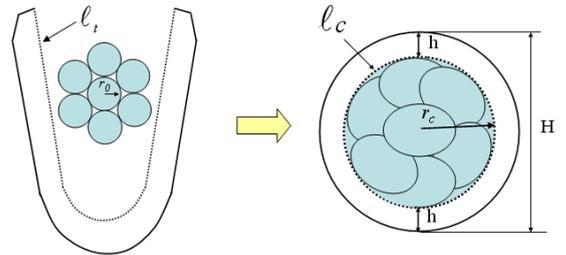
압착 공정에서 압축률 α 은 압착 전, 후 와이어 묶음의 면적의 비로 정의된다.

$$\alpha = (S_c / S_0) \times 100\% \quad (1)$$

식 (1)에서 S_c 는 압착 후 와이어 묶음의 면적,



(a) Shape of original



(b) Shape of assumption

Fig. 4 Cross-section shapes after crimping

S_0 는 압착 전 와이어 묶음의 면적을 나타내고, 각각은 다음과 같다.

$$S_0 = n \times \pi \times r_0^2, \quad S_c = \pi \times r_c^2 \quad (2)$$

식 (2)에서 n 은 와이어 개수, r_0 은 한 개 와이어의 반경을 의미하며 r_c 은 압착 후 와이어 묶음의 반경을 의미한다. 또한 식 (1), 식 (2)에서 압착 후 원형 와이어 묶음의 반경 r_c 및 둘레의 길이 l_c 는 식 (3)같이 표현할 수 있다(Fig. 4(b)).

$$r_c = \sqrt{\alpha \times n} \times r_0, \quad l_c = 2\pi \sqrt{\alpha \times n} \times r_0 \quad (3)$$

압착 전, 후 터미널 내면 길이가 변화가 없는 조건하에서 내면 길이는 압착 후 와이어 묶음의 둘레의 길이와 같게 된다. 따라서 터미널 내면 길이 l_t 는 다음과 같은 식으로 나타내진다.

$$l_t = l_c = 2\pi \sqrt{\alpha \times n} \times r_0 \quad (4)$$

3.2 압착 높이 이론적 계산

Fig. 4 에서 표시한 압착 높이 H 설정은 앞에서 언급한 압착 관련 규격 압축률과 밀접한 관계가 있다. 또한 Fig. 4(b)에서 압착 후 단면 형상을 원

형 형상으로 가정하고, 터미널 두께 변화가 없다고 가정하였기에 압착 높이는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$H = 2h + 2r_c = 2(h + \sqrt{\alpha \times n} \times r_0) \quad (5)$$

식(5)에서 h 은 터미널 두께를 의미한다.

실제 공정에서 터미널, 와이어 압착 후 단면 형상은 본 연구에서 가정한 것 같이 이상적인 원형 형상을 유지할 수 없다. 따라서 이론적 계산을 바탕으로 현장 경험적 치수와 결합시켜 아래와 같은 계산식을 얻게 되었다.

$$\ell_{t1} = 2\pi\sqrt{\alpha \times n} \times r_0 \times 1.4 \quad (6)$$

$$H_1 = 2(h + \sqrt{\alpha \times n} \times r_0) \times 0.9 \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)은 실제 압착 공정을 고려한 터미널 내면 길이 ℓ_{t1} 및 압착 높이 H_1 에 대한 이론적 계산식을 나타낸다.

4. 전기 커넥터 2D 모델 유한요소해석

4.1 터미널 내면 길이 설계

현장 경험에 의한 AVSS2.0 와이어 모델에 대응하는 터미널 설계 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보면 터미널 내면 길이는 8.4mm, 두께는 0.4mm로 설계되었다. 또한 압착 규격 압축률 80%[2]를 만족하기 위한 터미널, 와이어 압착 후 압착 높이는 2.30mm로 설정되었고, 터미널 내부 길이 외 다른 설계 치수는 기존 치수로 설계되어 있다.

4.2 유한요소해석 모델

터미널, 와이어 제품에 사용되는 황동, 구리 소재에 대하여 인장실험을 수행하였으며, 시편은 KS13B 규격에 맞추어 제작하였다. 재료 구성성분은 Table 2에 나타내었고, 인장 실험으로부터 얻어진 진응력-진변형률 곡선은 Fig. 6에 나타내었다.

전기 커넥터의 터미널, 와이어 압착 공정 해석은 범용 CAE 소프트웨어인 ABAQUS Version 6.5 Explicit를 이용하여 해석하였다. 터미널, 와이어 압착 공정 해석 모델을 Fig. 7에 나타내었고, 해석에 사용된 입력 값을 Table 3에 나타내었다. 유한요소해석 모델은 실제 압착 공정을 고려한 2D 평

Table 2 Material components properties

	Cu(%)	Zn(%)	Pe(%)	Pb(%)
Terminal (Brass)	68	31.9	0.05	0.05
Wire (Copper)	99.3	0.3	0.2	0.2

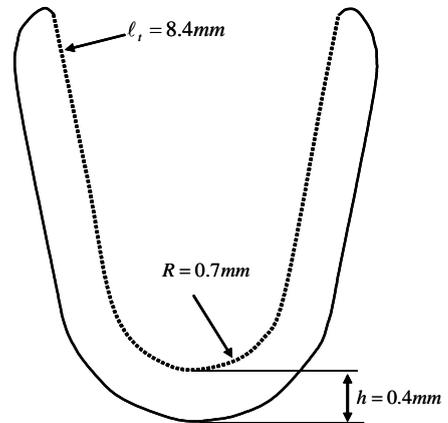


Fig. 5 Dimension of terminal for AVSS2.0 wire model crimping

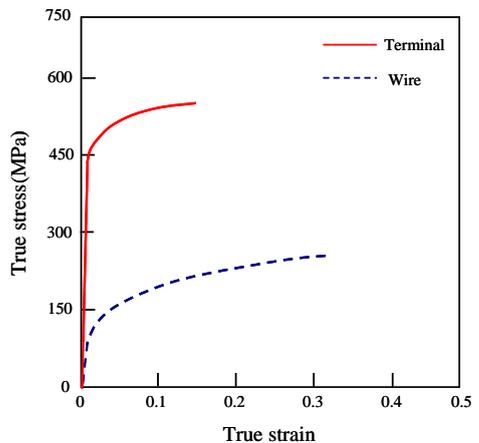


Fig. 6 Stress-strain curve form tensile test

면응력(plane Stress)조건으로 해석을 실시하였다. 또한 재료는 등방성으로 가정하였으며, 압착 공구는 강체(Rigid body)로 가정하였다. 해석에서 터미널과 펀치 접촉, 터미널과 다이 접촉, 터미널과 와이어 접촉, 와이어와 와이어 사이 접촉, 터미널 내부 접촉에 대한 해석 조건을 설정하는 것이 매우 중요하다.

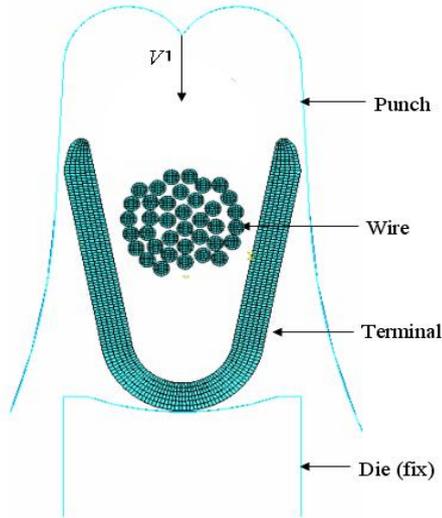
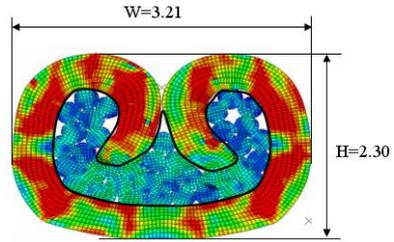
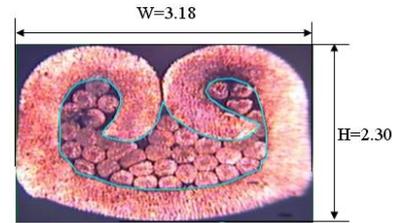


Fig. 7 Finite elements simulation model



(a) Result of simulation



(b) Result of experimentation

Fig. 8 Shape of final 2.30mm crimp height

Table 3 Parameters used in simulation

	Terminal	Wire
Poisson's ratio	0.30	0.30
Density	8530kg/m ³	8960 kg/m ³
Friction coefficient	0.15	0.10
Crimping velocity	0.25mm/sec	0.25mm/sec

Table 4 Compressibility after crimping

	Area (mm ²)	Compressibility
Simulation	2.0685	105.3%
Experimentation	2.0124	102.4%

5. 해석 결과 및 고찰

5.1 AVSS2.0 모델 해석 결과

현장경험에 의한 AVSS2.0 와이어에 대응하는 터미널 초기 모델에 대한 압착 성형 해석과 단면 측정 실험 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림 8(a)은 해석 결과를 나타내고, 그림 8(b)은 실험 결과를 나타낸다. 또한 설정 압착 높이가 2.30mm 인 경우 압착 후 와이어 묶음의 면적과 압축률을 Table 4에 나타내었다. 해석과 실험에서 터미널 양쪽 날개가 안쪽으로 과다 말려있으며 와이어 사이 빈 공간이 많이 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 압축률은 해석에서는 105.3%, 실험에서는 102.4%으로써 압축률 규격 80%를 만족하지 못하였다. 이와 같은 압착 불량은 향후 전기 커넥터 전기 전도성에 큰 영향을 미치게 된다. 이는 현장 경험에 의해 설정된 터미널 내면 길이 및 압착 높이가 적합하지 않음을 알 수 있다.

5.2 AVSS2.0 모델 터미널 이론적 설계

초기 터미널 모델과 성형 해석 결과를 바탕으로 압축률에 미치는 영향을 고려한 이론적 계산을 통한 설계 터미널 형상을 Fig. 9에 나타내었다. 압축률 규격 80%을 만족하기 위한 터미널 내면 길이와 압착 높이는 이론적 계산식 (6), 식 (7)에 의하여 6.20mm, 1.95mm로 설정하였다. 편차와 고정 다이는 변화가 없고 동일한 해석 조건하에서 수정 모델에 대하여 해석을 실시하였다.

5.3 AVSS2.0 수정 모델 해석 결과

앞 절과 동일한 해석 조건하에서 터미널 수정 모델에 대한 압착 성형 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그리고 설정 압착 높이가 1.95mm인 경우 압착 전, 후 와이어 묶음의 면적과 압축률은 Table 5에 나타내었다. 그림에서 보면 압축 단면 형상은 이상적인 "B"형상을 나타내었고, 와이어 사이 빈 공간이 없는 것으로 나타내었다. 또한 압축률은 80%로서 압착 규격을 만족하였다. 수정 모

텔에 대한 성형 해석 결과로부터 이론적 계산식에 의해 설정된 터미널 내면 길이 및 압착 높이가 타당함을 알 수 있다.

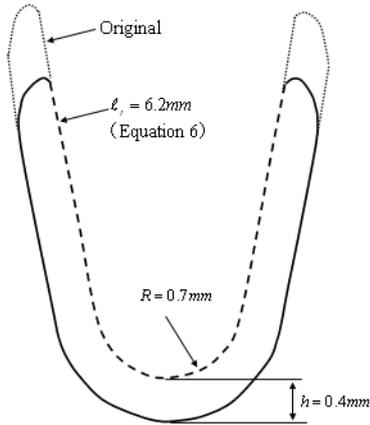
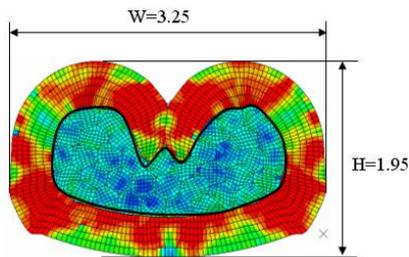


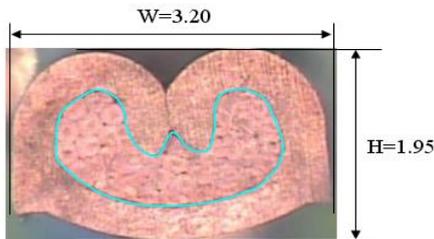
Fig. 9 New dimension of terminal for AVSS2.0 wire model crimping

Table 5 Compressibility after crimping

	Area (mm ²)	Compressibility
Simulation	1.5715	80%
Experimentation	1.5824	80.2%



(a) Result of simulation



(b) Result of experimentation

Fig.10 Shape of final 1.95mm crimp height

5.4 모델 변경 전, 후 저항 변화 측정

열 충격 실험 및 온, 습도 실험에서의 저항 변화 측정 결과를 Fig. 11에 나타내었고, 실험에서의 저항 변화의 측정방법 및 저항 변화 규격 값을 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 저항 값 R0은 터미널, 와이어 압착 전 피복을 가진 순수 와이어의 저항 값을 나타낸다. 저항 측정은 HIOKI 3541 모델 마이크로옴메터 저항측정기를 이용하였고, 저항 측정길이는 75mm로 설정하였다. 터미널 설계 변경 전, 후 압착 후 저항 변화 값은 0.30mΩ, 0.27mΩ으로써 저항 변화 규격 0.55mΩ을 만족하였다. 설계 변경 전 열 충격 및 온, 습도 실험에서의 저항 변화 값은 0.41mΩ, 0.38mΩ으로써 저항 변화 규격 값 0.33mΩ을 초과하였다. 그러나 터미널 모델 설계 변경 후 저항 변화 값은 0.25mΩ, 0.28mΩ으로서 저항 변화 규격 값을 만족하였다. 이는 열, 충격 실험 및 온, 습도 실험에서의 저항 변화는 터미널 내면 길이, 압착 높이, 압축률과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Table 6 Specifications of resistance change

Process	After crimping	Thermal test	Humidity test
Resistance	R1	R2	R3
Resistance change	$\Delta 1 = R1 - R0$	$\Delta 2 = R2 - R1$	$\Delta 3 = R3 - R2$
Spec	$\Delta 1 < 0.55m\Omega$	$\Delta 2 < 0.33m\Omega$	$\Delta 3 < 0.33m\Omega$

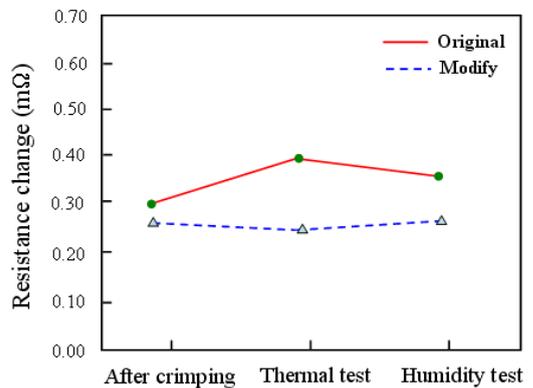


Fig.11 Comparison between resistance change of original model and modify model

6. 결론

본 연구에서는 전기 커넥터 터미널 압착 공정에 있어서 규정된 와이어 모델에 대한 터미널 내면 길이 치수 및 압착 관련 압축률 규격을 만족하기 위한 압착 높이 설정 이론적 계산식을 도출하였다. 또한 이론적 계산 설계를 적용한 전기 커넥터 2D 모델 유한요소해석을 수행하고 실제 제품 압착 단면 형상과 비교하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 전기 커넥터 터미널 압착 공정 해석에 있어서 실제 공정을 고려한 2D 모델 평면응력조건으로 해석을 수행하는 것이 적합한 것이라고 판단된다.

(2) 이론적 계산식에 의한 터미널 내면길이 및 압착 높이의 치수를 생산에 적용할 경우 압착 성형 후 압착 관련 규격을 만족함을 알게 되었다.

(3) 재료 치수 변경에 따른 압착 관리 치수(압착 높이, 압착 폭, 압축률)를 시뮬레이션으로 평가함으로써 압축 불량을 줄이고 개발 시간을 단축하게 되었다.

(4) 터미널 설계 변경을 통하여 터미널과 와이어 압착 후 열 충격 실험 및 온, 습도 실험에서 전기 커넥터 저항 변화 값이 규격을 만족함을 알게 되었다.

후 기

본 연구는 경북대학교 BK21 사업의 일환으로 (주)티에이치엔 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, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 30, No. 3, pp. 36~41.
- [2] Engineering standard of crimping process, Hyundai ·Kia Motor Co., Ltd, ES91101-00.
- [3] Y. S. Kim, 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, Numerical 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 Journal of Technology, Vol. 4, pp. 8~15.
- [7] J. J. Schindler, R. T. Axon, and R. S. Timsit, 1995, Mechanical an electrical contact properties of wedge connectors, Proceedings of the 41st IEEE Holm Conference., 0-7803-2728-4, pp. 1~9.
- [8] G. G. Weber and A. N. Zava Plangos, 1990, An objective time integration procedure for isotropic rate-independent elastic-constitutive equations, International Journal of plasticity, Vol. 6, pp. 701~ 749.
- [9] D. P. Flanagan and T. Belytschko, 1984, Eigenvalues and stable time steps for the uniform strain exahedron and quadrilateral, ASME, Journal of applied mechanics, Vol. 51, pp. 35~40.
- [10] Korea Electric Terminal Co., Ltd., 2007, Terminal design standard, Internal Report.