

# CAE 해석을 통한 차량 전장시스템의 커넥터 성능향상

김준형\* · 이종수†

## Connector Performance Improvement of Automobile Wiring Harness System using CAE Analysis

Junhyung Kim, Jongsoo Lee

**Key Words :** Automobile Connector(자동차 커넥터), P.B.T.(폴리부틸렌 테레프탈레이트), Thermal Properties(열적 물성치), Finite Element Analysis(유한요소해석), Axiomatic Design(공리설계)

### Abstract

Recently an automobile industry is concerned about an automobile wiring harness system. It means that development of component modules is on the increase. An importance of the connector in one part of the modules will be enhanced. A connector is made of P.B.T. (Poly Butylene Terephthalate). PBT is resistant to the high temperature. This paper deals with thermal strain of connector. According as temperature increase, effects of the temperature and thermal strains give an analysis of the deformation using ABAQUS. This apparent thermal strain results actually from the variation of temperature. Being based on this analysis, axiomatic design applies to design parameters of the connector. As compared with CAE analysis, a performance improvement makes certain of the truth of the matter.

### 기호설명

$\Delta L$  : 변형률  
 $\alpha$  : 열팽창 계수  
 $T_0, T$  : 온도  
 $f$  : 열응력  
 $E$  : 탄성계수  
 $\nu$  : Poisson 비  
 $e_x, e_y$  : 변형률  
 $\tau_{xy}$  : 전단응력  
 $\gamma_{xy}$  : 전단변형도  
 $X_s, Y_s$  : 구속조건  
 $n$  : 평면에서 법선방향  
 $\phi$  : 응력 함수

### 1. 서론

급변하는 시장 수요로 인한 제품 수명의 단축에 따라 소량, 다품종 생산이 절실히 요구되고 있다. 이는 자동차 부품산업에도 큰 영향을 미친다. 자동차를 구성하는 부품에는 여러 가지가 있지만 그 중에서 전장시스템의 한 부분인 커넥터는 자동차에 전기적인 기능을 부여하는 중요한 부품이다. 최근에는 모듈(module)산업이 발달하기 시작하면서 몇 개의 부품이 새로운 부품으로 구성되어 제품의 중요도와 수명에 따라서 새로운 제품으로 생산 및 유지되고 있다 이는 자동차 산업에 큰 영향을 주는 새로운 요소가 되었다.<sup>(1)</sup> 부품산업은 자동차를 생산, 조립에 중요한 구성요소로서 자동차를 생산하는 기업에 못지않게 새롭게 떠오르고 있는 산업이자 기업이다. 모듈산업의 파급효과는 자동차의 판매이상의 기대를 가져올 수 있으며, 이는 부품산업만으로 하나의 독립적인 자리를 차지할 수 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 전장시스템의 구성 요소인 커넥터의 역할도 점점 비중이 높아 가고 있다. 자동차에 사용되는 커넥터에는 기능과 위치에 따라서 각

† 책임저자, 정회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : jleej@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4474 FAX : (02)362-2736

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

각 다른 모델로 설계된다. 이는 조립하는 과정에서 손쉽게 구별하기 위한 목적에도 부합된다. 작은 부품이지만 다품종 대량생산이 가능한 커넥터는 요구사항에 따라서 다양한 모델로 자동차에 따라 알맞게 적용될 수 있다.

자동차의 고장요인 중에서 검증이 어려운 부분이 커넥터에 관련된 사항이다. 자동차가 주행하면서 발생하는 진동과 엔진에서 발생하는 고온에 잘 견딜 수 있는 커넥터를 생산하는 것이 중요하다. 커넥터의 재료에는 폴리부틸렌 테레프탈레이트(Poly Butylene Terephthalate, P.B.T.)가 사용된다. P.B.T.는 강인하고 강성도가 크며, 내열성, 내열노화성이 우수한 결정성이 있는 열가소성 폴리에스테르이다. <sup>(3)</sup> 하지만 장기적인 진동과 고온은 재료의 한계를 넘어서 커넥터의 기능을 마비시키고 있다. 변형에 따른 결합부위의 파손과 그에 따른 접촉불량은 커넥터뿐만 아니라 모듈로 제작된 부품전체의 수명에 큰 영향을 미친다. 커넥터는 크기가 작은 부품이므로 한번 출시된 자동차가 커넥터의 불량으로 수리를 한다면 수리비용도 만만치 않지만 파손된 커넥터를 찾는 것도 어렵다. 이는 커넥터와 구성된 모듈전체의 교체가 이루어져야 한다. 자동차 부품의 모듈화가 가속화 되면서 모듈을 이루는 각각의 부품의 중요성도 무시할 수 없다. 모듈로 제작된 부품의 수명과 자동차의 유지 및 보수를 줄이기 위해서 커넥터에 대한 연구는 앞으로 중요한 과제라고 할 수 있다.

본 연구에서는 전장시스템에 사용되는 커넥터의 불량 요인을 알아보고자 고온이 커넥터에 미치는 영향을 보고 온도분포에 의해서 발생하는 응력을 해석하고자 한다. 불량 요인에는 복합적인 요소가 작용하지만 고온이 커넥터 전체에 미치는 영향을 무시할 수 없으므로, 고온이 커넥터에 미치는 영향을 보고 커넥터의 변형을 알아본 후 커넥터의 취약점을 보완하고자 한다. 고온이 커넥터 전체에 미치는 영향을 분석한 후에 공리설계를 적용하여 커넥터의 취약점을 보완, 앞으로 커넥터 설계에 필요한 곳을 전개하고자 한다.

H.K.S.사의 ABAQUS 를 이용해서 온도가 커넥터에 미치는 영향을 파악한 후 이 영향을 근거로 커넥터의 변형을 해석한 후 해석 결과를 토대로 설계변수를 설정하고 공리설계에 의해서 보다 나은 커넥터를 설계하고자 한다. <sup>(7)(8)(9)(10)</sup>

## 2. 열응력 이론

### 2.1 열응력 관계식

모든 물질은 온도에 영향에 의해서 팽창이 이루

어진다. 온도가 주기적으로 변함에 따라서 정도의 차이가 달라지고 시간에 의해서도 많은 변화가 있다. 식(1), 식(2)는 온도에 따른 변형률에 관한 식이다.

$$\Delta L = \alpha L(T - T_0) \quad (1)$$

$$\Delta L = \frac{fL}{E} \quad (2)$$

여기서  $\Delta L$ 는 온도에 따른 변형률 양,  $\alpha$ 는 열팽창 계수,  $T_0, T$ 는 온도의 변화를 의미한다.  $f$ 는 열응력이고,  $E$ 는 탄성계수를 의미한다. 식(1), 식(2)에 의해서 열응력은 식(3)과 같이 표현된다.

$$f = -\alpha E(T - T_0) \quad (3)$$

### 2.2 2차원평면에서 열응력 관계식

2차원평면에서 열응력식은 식(4)와 같다. 변형률과 응력뿐만 아니라 평면에서의 구속조건에 의해서 응력 함수는 식(5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E}(f_x - \nu f_y) + \alpha T \\ e_y &= \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{E}(f_y - \nu f_x) + \alpha T \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 e_y}{\partial x^2} \\ \frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \quad \text{no body force} \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_x \cos(n, x) + \tau_{xy} \cos(n, y) &= X_s \\ \tau_{xy} \cos(n, x) + f_y \cos(n, y) &= Y_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nabla^4 \phi + \alpha E \nu T &= 0 \\ \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에 의해서 응력함수와 구속조건의 관계식은 식(6)과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = -\int_{s_0}^s Y_s ds, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\int_{s_0}^s X_s ds \quad (6)$$

S는 대상 본체의 길이가 된다.

$\phi = U - V$  라 하면 식(5)는 식(7)로 전개된다.<sup>(4)</sup>

$$\nabla^2 = \alpha ET, \nabla^4 U = 0 \quad (7)$$

### 3. 공리설계

#### 3.1 공리설계의 개요

설계란 사용 목적과 목적에 맞는 구현이 연속적으로 상호 작용하는 것을 말한다. 설계절차는 설계과정에서 두 가지 영역이 상호 작용한 결과이다. 하지만 사용목적과 구현은 본질적으로 서로 독립적이다. 이 독립적인 두 영역을 연관시키는 것이 공리 설계이다.<sup>(5)</sup>

1990 년 MIT 서남표 교수가 제안한 설계 원리에서 출발한 공리설계는 기능요구사항의 독립성을 유지하는 독립공리와 정보량의 최소화하는 정보공리가 있다. 설계과정에서 목적에 부합하는 기능요구사항(functional requirement, FRs)라 하고 FRs 를 만족시키기 위한 설계파라미터(design parameters, DPs)로 이를 구현한다. 설계과정은 기능적 영역의 FRs 는 물리적 영역의 DPs 에 연결시키는 과정이 포함된다. 관계식은 식(8)과 같다.

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (8)$$

[A]는 설계행렬이고 2 차원의 경우에 [A]는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

설계행렬은 연관이 있으면 0 로 연관이 없거나 적으면 X 로 표기된다. 식(10)은 비연성화 설계 공리설계에 부합하는 것을 보여준다.<sup>(6)</sup>

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

#### 3.2 공리설계의 적용

본 연구에서는 자동차 전장시스템의 커넥터 성능향상을 구현하기 위해서 열전도가 낮은 즉 열하중이(thermal strain)이 낮게 평가되는 것은 FRs 로 선정하고, 이를 낮추기 위한 인자를 DPs 다음과 같이 설정하였다.

- FR1 : 내부에서 작용하는 저온에 잘 견딘다.
- FR2 : 외부에서 작용하는 고온에 잘 견딘다.
- DP1 : 내부환경에 민감한 인자
- DP2 : 외부환경에 민감한 인자

Fig.1 은 커넥터의 3 차원 모델이다. 본 연구에서는 Fig.2 와 같이 x-z 방향의 커넥터 단면을 선정해서 2 차원 모델을 선정하여 각각의 설계변수를 지정하였다. 이는 커넥터의 전체 형상에 대한 해석보다는 모델의 단순화와 내부의 온도변화를 쉽게 관찰, 비교하기 위함이다. FRs 은 변형률을 줄이기 위한 요구사항이고 DPs 는 온도에 영향을 받는 커넥터의 치수이다. 커넥터의 전체적인 설계변경보다는 기존의 커넥터에서 치수 변경이 가능한 인자를 설정하였다. 그리고 이는 비연성화 설계로서 식(11)과 같이 나타낼 수 있다. Table 1.은 커넥터에 공리설계가 적용되는 FRs, Table2.는 DPs 를 나타내고 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{21} \\ FR_{22} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} X & O & O & O \\ X & X & O & O \\ O & X & X & X \\ O & O & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{21} \\ DP_{22} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

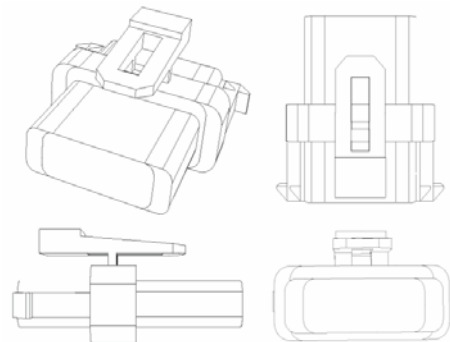


Fig. 1 3-D connector

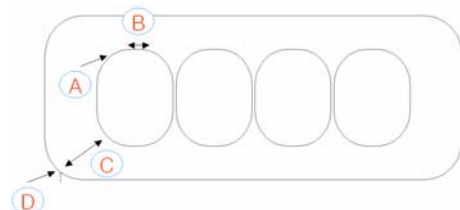


Fig. 2 2-D Connector and Design Parameters

## 4. 커넥터 2-D 해석 (CAE Analysis)

### 4.1 커넥터 2-D 설계

2-D 도면은 ABAQUS CAE 라는 상용프로그램으

로 일차 단계인 도면 작업과 메쉬(Mesh)를 하였다. 기존의 커넥터의 모형을 그대로 구현하고 초기 입력조건으로 외부 입력온도는 393K, 내부 입력온도는 313K 로 고정시키고 온도가 형상에 미치는 영향을 보았다. Fig. 3 은 초기 모델로 DP's 의 치수 (mm)를 나타내고 있다. Fig. 4 는 초기 모델의 메쉬 형태이다.

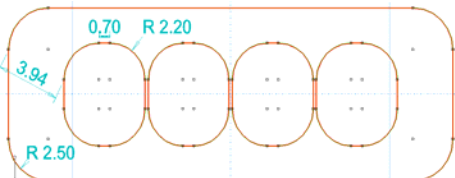
해석의 순서는 다음과 같다. 온도가 커넥터에 미치는 영향을 1 차로 해석하고 그 결과를 다시 입력으로 2 차에서는 온도에 영향에 근거한 열응력을 해석하는 것이다. 해석 순서는 Fig. 4 와 같다.

**Table 1** Functional requirement in connector

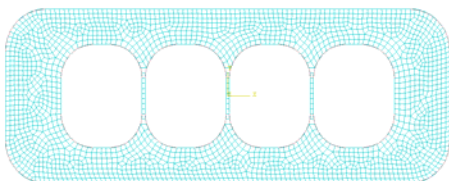
FR <sub>11</sub>	Decrease thermal stress at part A
FR <sub>12</sub>	Decrease thermal stress at part B
FR <sub>21</sub>	Decrease thermal stress at part C
FR <sub>22</sub>	Decrease thermal stress at part D

**Table 2** Design Parameters in connector

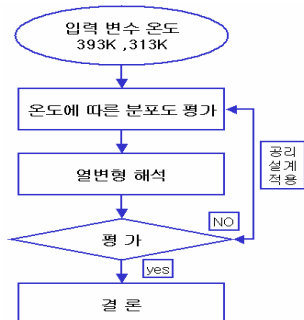
DP	DP <sub>11</sub>	DP <sub>12</sub>	DP <sub>21</sub>	DP <sub>22</sub>
Lengths of connector	A	B	C	D



**Fig. 3** Initial design of connector (2-D)



**Fig. 4** Initial design with mesh (2-D)



**Fig. 5** Flow chat in analysis

4.2 초기 모델의 해석 결과

4.2.1 온도분포 해석 결과

온도분포 해석은 Table 2 에 있는 P.B.T.의 물성치와 외부, 내부 온도가 393K, 313K, 해석 시간은 300 시간으로 온도가 미치는 영향을 해석하였다.

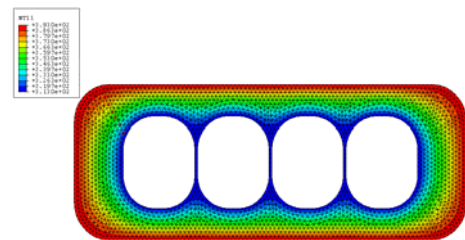
Fig. 6 은 커넥터의 온도 해석이며 Fig. 7 은 시간에 따른 노드에서 온도분포를 나타내고 있다.

4.2.2 열응력 해석 결과

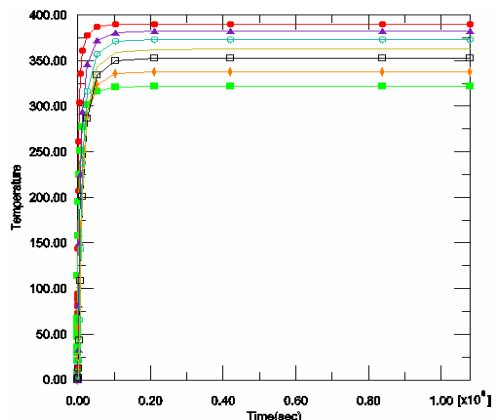
열응력 해석은 시간에 따라 각 노드에서 얻은 온도 분포를 입력하여 열응력 해석을 하였다. 물성치는 Table 3 과 동일하게, mesh 도 동일하게 설정 하였다. 해석시간도 300 시간 설정하였다. 단 ABAQUS 를 이용한 해석에서 해석분야에 따라서 메쉬타입이 바뀌므로 열응력에 해당하는 메쉬타입을 설정해서 해석하였다. Fig. 8 은 커넥터의 응력 해석 결과이다. Fig. 9 는 시간에 따른 노드에서 응력분포를 나타내고 있다.

**Table 3** Properties in P.B.T.

Density	1.34
Thermal Conductivity	0.18
Specific heat	1170
Modulus of Elasyty	1.93x10 <sup>9</sup>
Poisson's ratio	0.38
Thermal expansion	108x10 <sup>-6</sup>



**Fig. 6** temperature distribution of connector



**Fig. 7** temperature distribution of nodes

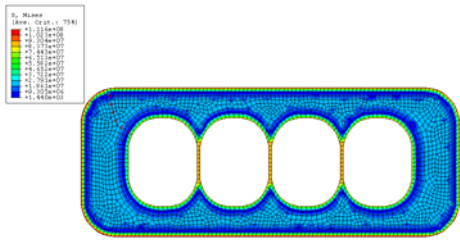


Fig. 8 Stress distribution of connector

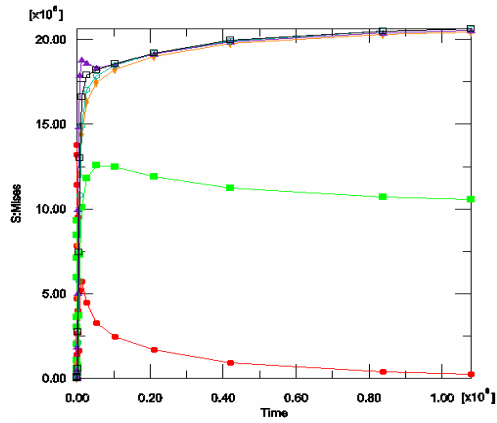


Fig. 9 Stress distribution of nodes

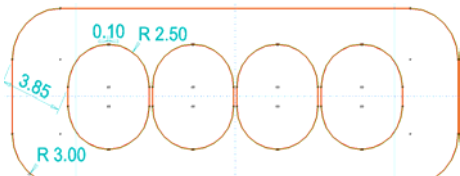


Fig. 10 Advanced design of connector (2-D)

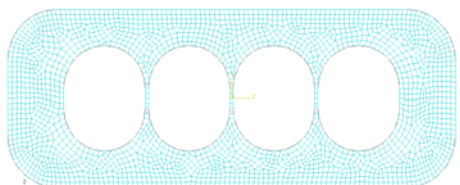


Fig. 11 Advanced design with mesh (2-D)

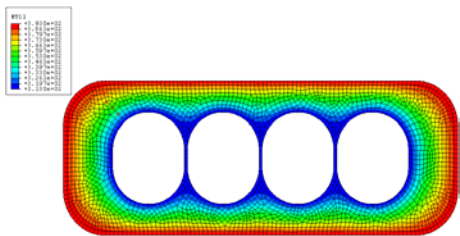


Fig. 12 temperature distribution of connector

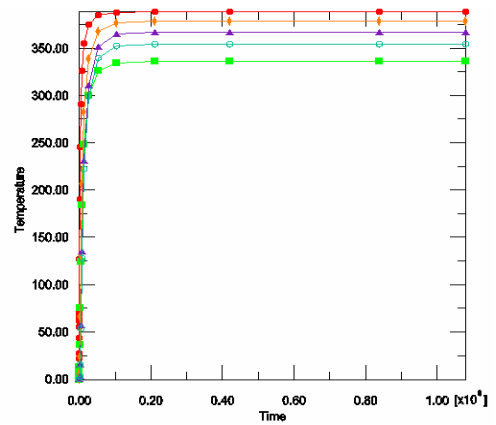


Fig. 13 temperature distribution of nodes

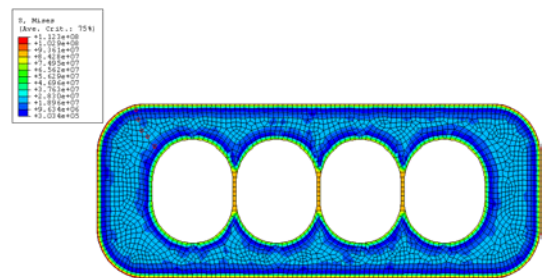


Fig. 14 Stress distribution of connector

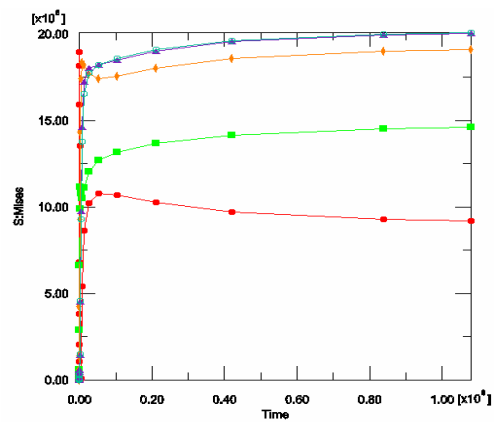


Fig. 15 Stress distribution of nodes

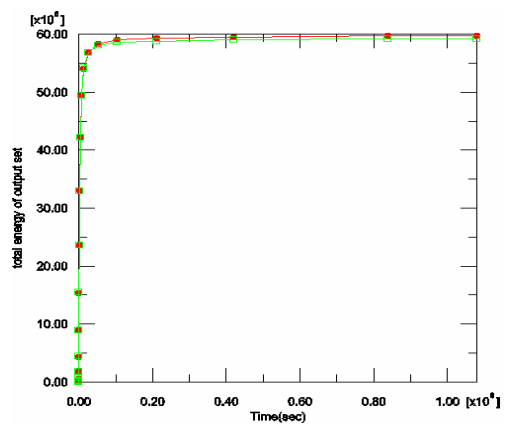


Fig. 16 Stress distribution of designs

## 5. 공리설계 적용

### 5.1 공리설계를 적용한 2-D 커넥터

초기 커넥터 모델과 열응력 해석 결과를 바탕으로 내부와 외부에 미치는 영향을 고려한 개선된 커넥터 2-D 모델링을 하였다. 공리설계에 부합하는 조건으로  $DP_{11}$ 에 의해서  $DP_{12}, DP_{21}$  순으로 치수변경이 이루어지고 마지막으로  $DP_{22}$ 의 치수변경까지 비연성화 설계를 하였다. Fig. 10은 공리설계가 적용된 모델이다. Fig. 11은 메쉬작업을 한 모델이다.

### 5.2 수정 모델의 해석 결과

#### 5.2.1 온도분포 해석 결과

앞 절과 같은 절차에 의해서 외부, 내부 온도가 393K, 313K, 해석 시간은 300 시간으로 온도가 미치는 영향을 해석하였다. Fig. 12는 커넥터의 온도 해석이며, Fig. 13은 시간에 따른 노드에서 온도분포를 나타내고 있다.

#### 5.2.2 열응력 해석 결과

열응력 해석은 시간에 따라 노드에서 얻는 온도분포를 입력으로, Fig. 14는 커넥터의 응력 해석 결과이며, Fig. 15는 시간에 따른 노드에서 응력분포를 나타내고 있다. Fig. 16은 초기 모델과 개선된 모델의 전체 응력변화를 나타내고 있다.

## 6. 결론

외부, 내부에서 작용하는 온도에 의해서 열하중을 받는 커넥터의 응력해석을 초기 모델에서 해석하고 공리설계를 적용한 모델에서 해석을 수행하였다. 커넥터 외형자체에는 수치변경이 불가능하고 현재 사용되고 있는 커넥터의 전체적인 수정보다는 내부와 그에 밀접한 관계가 있는 외부 치수 변경으로 커넥터의 모델을 수정 해석하였다. 커넥터는 크기가 작을 뿐만 아니라 쓰임새에 따라서 종류가 다양하기 때문에 모든 커넥터의 해석보다는 엔진에 가까이 있고 온도의 영향이 큰 커넥터를 선정하여 열응력 해석을 하였다. 작은 치수 변화에도 불구하고 온도가 미치는 영향은 유사했으나, 응력해석에서 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 커넥터 전체 노드에서 응력분포곡선을 표기한 것은 아니지만 국부적으로 온도에 약한 부분이 보였고, 이는 앞으로 커넥터 설계에서 참고 할 사항으로 간주된다. 2-D에서 해석을 시작한 이유도 3-D 커넥터의 모델에서 메쉬와 해석의 어려움이 있었고, 앞으로 2-D 결과를 바탕으로 3-D로의 확장

과 커넥터의 응력변형의 주요인이 될 수 있는 온도와 진동의 복합적인 문제를 연구하는 것도 새롭게 연구 과제가 될 것이다. 자동차 부품에서 뿐만 아니라, 커넥터는 자체적으로 구속조건이 되는 지지대 역할이 불분명하여 하중에 따른 구속조건이 문제되고 있다. 이 또한 커넥터만의 해석이 아닌 커넥터 하우징과 터미널, 이를 연결하는 전선의 전체 모델의 응력해석이 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) Yoo, W. S., 2002, "Module Assembly in Automotive Industries", The Korea Society of Automotive Engineers, Vol.24 No.4, pp.14~21.
- (2) Park, S. G., 2002, "Automobile and Module Revolution in the 21st century" Bo sung gak, Korea, pp.150~161.
- (3) Kim., G. S., Lee., S. H., Kim., Y. J., Kim., Y. S., 1994, "Materials Science of Polymers for Engineers", Hyung seul Publish Company, pp.170~171.
- (4) Boley, Bruno A., 1960, "Theory of thermal stresses", Wiley, U.S.A., pp.1-2, 17~18.
- (5) Nam Pyo Suh, 2002, "Aximatic Design", Dongmyung Publish Company, Korea, pp.32~33.
- (6) Park, G. J., Do, S. H., Suk, N. P., 1999, "Design and Extension of Software Systems Using the Aximatic Design Framework", KSME International Journal, Vol.23, No.9, pp.1536~1549.
- (7) H.K.S., 2002, "ABAQUS/CAE User's Manual", H.K.S., U.S.A., pp.16-1~16-6.
- (8) H.K.S., 2002, "ABAQUS/Standard User's Manual", H.K.S., U.S.A., pp.6.5.3-1~6.5.4-8.
- (9) H.K.S., 2002, "ABAQUS/Benchmarks Manual", H.K.S., U.S.A., pp.1.6.1-1.6.2.
- (10) H.K.S., 2002, "ABAQUS/Example Problems Manual", H.K.S., U.S.A., pp.4.1.1~4.1.4.