

# 유한요소법을 이용한 고전압 커넥터의 안전성평가에 관한 연구 A Study of Safety Evaluation for Automotive High-Voltage Connector Using FEM

\*김성웅<sup>1</sup>, #최정욱<sup>1</sup>, 김형락<sup>1</sup>, 강남진<sup>1</sup>, 최경석<sup>1</sup>, 박형필<sup>2</sup>, 차백순<sup>2</sup>  
\*S. W. Kim<sup>1</sup>, #J. W. Choi(jwchoi@ikum.kr)<sup>1</sup>, H. L. Kim<sup>1</sup>, N.J.Kang<sup>1</sup>, K.S.Choi<sup>1</sup>, H.P.Park<sup>2</sup>, B.S.Cha<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> 케이유엠(주), <sup>2</sup> 한국생산기술연구원

Key words : FEM(유한요소법), High Voltage Connector(고전압커넥터), Shield Effectiveness(차폐효과), Voltage Drop(전압강하) Temperature Rising(온도상승), Insertion Force(삽입력), Terminal Retention Force(단자유지력)

## 1. 서론

최근 자동차분야에 있어서 지구환경 및 석유자원 고갈 문제로 전기 자동차 등의 차세대 미래형 자동차에 대한 관심이 커지고 있으며, 이는 선진 각국의 배기가스 규제치를 단기간 내에 충족시키며, 경제 활성화를 유도할 수 있는 대안으로 평가 받고 있다. 이 미래형 자동차들은 동력원이 화석연료가 아닌 전기를 사용하기 때문에 화석연료 의존성을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있음에 따라 각국에서는 미래 환경친화적 자동차에 대한 주도권 경쟁이 치열하게 전개되고 있고, 혁신적인 원가절감 및 안전성 확보 기술 개발을 위한 연구개발 및 투자가 활발히 진행되고 있다.

하지만 이들 미래형 자동차는 주행 중 고전압 및 대전류(400V/150A 이상)를 사용하여 대형 모터를 작동시키기 때문에 주변 전자기기들의 정상 작동을 방해하는 전자파 방사 노이즈가 발생되며, 큰 전기적 부하로 인해 전기적 저항에 의한 열 발생이 크다.

이에 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 전기적 접촉 안정성, 전류의 흐름, 체결 안정성, 작업편의성 및 차량 엔진과 부품간의 공진 회피구조 등을 고려하여 큰 부하에 의해 발생된 전자파를 차폐하는 고전압 커넥터에 대해 요구 성능에 부합되는 최적화 구조를 검토하였다. 적용한 유한요소해석 프로그램은 비선형 범용 프로그램인 MSC.Marc/Mentat 을 사용하였다.

## 2. 고전압 커넥터의 설계

본 연구에서 고전압 커넥터의 개략적인 설계 검토 항목은 다음과 같고, 고전압 커넥터의 구조는 Fig.1 에 나타내었다.

- 1) 커넥터 특성 검토 → 고전압커넥터, 차폐구조
- 2) 터미널(TERMINAL) 사이즈 및 구조 검토  
→ 접촉안정성, 전류흐름, 전기적 발열 상태
- 3) 하우징 외곽 사이즈(W×H×L) 및 내부 구조 검토  
→ 체결안정성, 작업편의성
- 4) 커넥터간 체결방식 검토 → 체결안정성, 작업편의성
- 5) 커넥터 공진회피구조 검토 → 고유진동수 해석

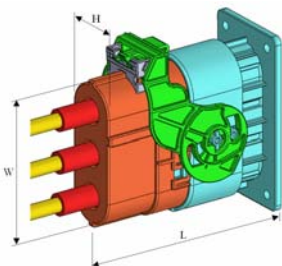


Fig.1 The 3D structure of high voltage connector

### 2.1 고전압 커넥터의 요구 성능

자동차용 고전압커넥터는 초기성능 및 내구성능에 대해 차폐성능, 온도상승, 전압강하 등 약 30 항목 이상의 요구 성능<sup>1)</sup>이 있으나, 본 논문에서는 주요 5 가지 항목에 대해

검토 되었으며, 그 항목을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 The performance for the high-voltage connector

Item	Unit	Performance	SPEC
Shield Effectiveness	dB	Min. 40dB	ES91500-00
Voltage Drop	mV/A	Max. 1.0	↑
Temperature Rising	℃	Max. 40℃	↑
Terminal Retention Force	kgf	Min. 10	↑
Insert Force btw. M/F TMLs	kgf	0.2 ~ 6.0	↑

## 3. 유한요소해석을 이용한 커넥터 설계

### 3.1 유한요소해석을 위한 원재료 특성

커넥터 설계를 위한 유한요소해석을 하기 위해서는 원재료 특성이 요구되어지며, Table 2 에 원재료 각각의 물리적/기계적/전기적/열적 특성에 대해 나타내었다.

Table 2 Material Properties for FE analysis

Item	Unit	PBT	Cu-Alloy	Sheet Metal
Elasticity modulus	MPa	4,700	113,000	212,000
Poisson's ratio	-	0.46	0.34	0.3
Coefficient of thermal expansion	1/K	6.7E-5	1.82E-5	1.66 E-5
Thermal conductivity	W/m·K	0.26	62	23.8
Electricity resistivity	μohm-cm	10E6	2.09	72
Specific heat	J/kg℃	1,712	380	500
Mass density	kg/m <sup>3</sup>	1.5E3	8.9E3	8.03E3
Tensile strength @ break	MPa	83	672	1030
Flexural strength @ yield	MPa	118	360	896

### 3.2 유한요소모델 생성

자동차용 커넥터의 일반적 구성은 작고 복잡한 부품들 다수 포함하고 있기 때문에, 해석신뢰도는 비교적 좋지한 요소생성에 대한 시간소요가 많고 형성이 어려운 8 절점 4 각요소(Three-dimensional Arbitrarily Distorted Brick)보다는 4 절점 3 각요소(Three-dimensional Four-node Tetrahedron)요소를<sup>2)</sup> 일반적으로 적용하고 있으며, 본 논문에서도 3 각요소로 모델링하여 해석하였다. Fig.2 에서는 3D 4Node-Tetrahedron 요소와 고전압 커넥터 단자의 Mesh generation 예를 나타내었다.

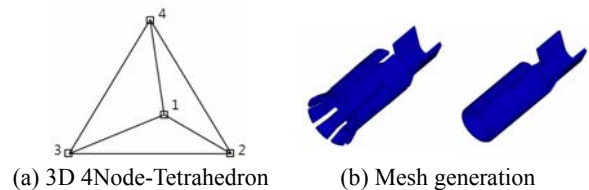


Fig.2 A mesh generation for Finite Element Method

### 3.3 고전압 커넥터의 유한요소해석 적용

본 절에서는 실제 작동조건을 부여하여 고전압 커넥터의 주요기능인 차폐성능해석을 수행하였고, 차폐성능구조를 기준으로 하여 커넥터의 구조안정성 및 작업편의성을 위한 구조/전기/열 해석을 수행하였다.

### 3.3.1 차폐성능해석

고전압커넥터는 차폐성능을 확보하기 위해 하우징 내에 Shield Metal 이 적용되게 되는데, 여기서 Bulk 형식과 Sheet 형식으로서 분류될 수 있다. 차폐성능은 Bulk 형식에 비해 비교적 떨어지지만 커넥터의 경량화, 비용절감 및 제작편의성이 우수한 Sheet Metal로 구조 최적화를 수행하였으며, 해석 결과는 저주파대역(510 ~ 1,710 kHz)에서 53~68dB, 고주파대역(70 ~ 108MHz)에서 53~68dB로 우수한 차폐성능을 얻을 수 있었다. Fig.3에서는 E-Field 분포에 대한 해석결과를 나타내었다.

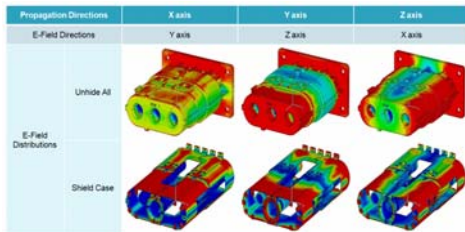


Fig. 3 Distribution of the E-Field for high voltage connector

### 3.3.2 전기·열 해석

자동차용 커넥터 전기·열 해석은 통전전류에 따른 열 발생에 대한 해석으로서, Joule heating에 대한 구조/열/전기에 대한 연성해석으로서 수행되었다. 실제 단자와 케이블이 서로 연결되어 있고 케이블에 부하(전류 및 전압)가 인가되면, 단자 내부저항에 의한 열이 발생되게 되는데, 인가되는 통전전류가 증가함에 따라 발생하는 열의 증가 경향을 분석하고, 기본 통전전류(150A) 인가 시 발생하는 열에 의한 열 평형 온도를 구하여, 요구성능에 부합되는 가를 해석한다. 여기서 실 부하에 대한 온도상승현상과 전압강하에 대한 해석을 수행하였다. Ring 형식 TML 구조와 강도 및 전도성을 고려한 원재료를 적용하여 해석한 결과로 전압강하는 0.2mV/A, 150A 통전 시의 온도상승은 35.2℃의 결과를 얻을 수 있었다. Fig.4는 전기·열 해석 및 구조해석에 대한 해석결과를 나타내었다.

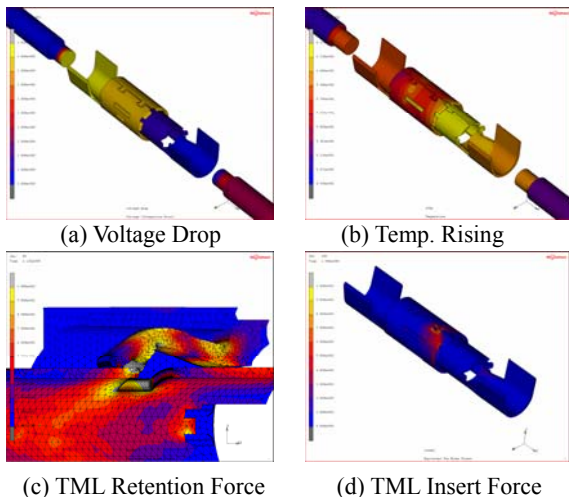


Fig. 4 Verification of the connector by using FEM

### 3.3.3 구조 해석

본 절에서는 구조안정성을 위해 항복강도 이하의 응력분포가 나타나는 안전한 구조를 기준으로 하여 체결안정성 및 작업성에 기초한 요구성능을 만족하도록 최적화하였다. 단자의 체결안정성의 지표인 단자유지력은 M측 34kgf / F측 65kgf로서 요구성능인 10kgf 이상을 만족하였고, 체결작업성 및 접촉안정성의 지표인 단자삽입력은 4.9kgf로서 0.2~6.0kgf의 요구성능을 만족하였다.

## 4. 고전압 커넥터의 선행해석 효율성 검토

유한요소법을 적용하여 최적화된 구조로서 제품을 제작하여 고전압 커넥터의 요구성능에 대한 시험을 진행하였고, 해석결과와 시험결과를 서로 비교하여 선행해석의 효과성을 분석하였다. 비교 결과, 실제 제품의 요구성능 값과 비교하여 제품제작에 앞서 진행한 커넥터 제품 해석의 신뢰도가 80~90% 수준의 결과를 보이고 있어, 고전압커넥터의 최적화 구조설계를 위한 유한요소법의 적용은 시행착오를 줄이고, 제작비용 절감에 효과적일 것으로 판단된다.

Fig.5는 실제 제작된 고전압커넥터 조립품을 나타내었고, Table 3은 고전압 커넥터 최종 구조의 해석결과와 시험결과를 나타내었다.



Fig.5 The manufactured high voltage connector assembly

Table 3 The comparison of performance between Test & FEA results

Item	Unit	Performance		SPEC
		TEST	FEM	
Shielding Effectiveness (510 ~ 1,710 kHz, 70 ~ 108 MHz)	dB	75.1	63.2	Min. 40dB
		59.9	58.8	Min. 30dB
TML Retention Force (Male)	kgf	65.7	64	Min 10
TML Retention Force (Female)	kgf	34.8	32.5	Min 10
Insert Force btw. M/F TML	kgf	4.9	4.7	0.2~6.0
Voltage Drop	mV/A	0.1	0.2	Max 1.2
Temperature rising @150A	℃	37.2	35.2	Max 60

## 5. 결론

본 연구에서 고전압 커넥터의 최적설계를 위해 유한요소 해석을 선행하였고, 이를 반영한 제품의 요구성능에 대한 시험결과와도 해석결과가 유사함을 알 수 있었다. 이에 고전압커넥터 개발 시 유한요소해석을 통한 설계는 제품 개발 시의 시행착오를 줄여 제품 구조 및 적용 원재료의 최적화를 위한 시간과 비용 절감에 효과적일 것으로 판단된다. 고전압 커넥터의 안전성평가에 대한 결과는 다음과 같다.

- 1) 차폐구조의 Sheet Metal 적용으로 제품은 경량화하면서 차폐성능은 58.8~63.2dB로서 40dB 이상의 성능을 나타내도록 하였다.
- 2) Female측 접촉구조를 외팔보 형식을 가지는 8점 접촉구조로 하고, 그 주위에 스테인레스강으로 지지하게 하여, 작업성 향상과 접촉안정성을 확보할 수 있었다.
- 3) 통전 시 열 발생을 최소화하기 위해, TML 단면 전체로 전류가 흐르도록 하여 전류 밀도가 국부적으로 집중되는 것을 방지하였다.

## 후 기

본 연구는 2008 지역산업선도기술개발과제의 연구비 지원(70004241)에 의해 수행된 연구 결과 임.

## 참고문헌

1. "ES SPEC : High Voltage Connector General", HMC/KMC 2008.09
2. "MSC.MARC MANUAL", MSC.SOFTWARE, 2001