

등가저항법을 이용한 전선의 전기저항 발열 해석

Joule Heating Analysis of Electric wire with using Equivalent Resistance Method

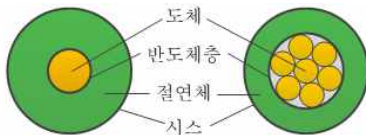
#정용호¹, *최성원¹, 김성훈², 이경원², 윤희석³, 최정욱⁴, 김성웅⁴

#Y.H.Jung¹(yhjung@topplus.co.kr), *S.W.Choi¹, S.H.Kim², K.W.Lee², H.S.Yoon³, S.W.Kim⁴, J.W.Choi⁴
¹전남대 기계공학과, ²남부대 산학협력단, ³전남대 기계시스템공학부, 케이유엠(주)

Key words : Joule Heating, Equivalent Resistance, Electric wire

1. 서론

전기저항 발열특성은 커넥터 등의 전자소자 설계의 기초자료로 활용되는데 실험에 많은 시간과 비용이 소요되므로 전선에 대한 시뮬레이션 기법을 정립하면 실험비용 감소를 기대할 수 있을 것이다. Fig. 1은 일반적인 전선의 단면을 보이고 있는데, 유연성 측면에서 유리한 연선도체 형태가 자동차 등에서 주로 사용된다. 이 형태의 전기저항 발열 해석을 위해서는 전선 자체의 발열뿐만 아니라 도선끼리의 접촉저항을 고려해야 한다.



(a) 단선도체(Solid Conductor) (b) 연선도체(Stranded Conductor)

Fig. 1 Electric wire

본 연구에서는 차량용으로 사용되는 AEXP Cable의 발열 정도를 전산해석을 통해 평가할 수 있는 기법을 개발하였고, 도선의 꼬임과 접촉특성을 모사할 수 있는 등가저항을 구하고 이를 해석에 적용하여 실험 결과와 비교함으로써 신뢰성을 확인하였다.

2. 전선의 전기저항 발열 시험

전선의 전기저항 발열 시험에는 자동차, 농장 기계 및 전기 장비에 대한 내부 전선으로 주로 쓰이는 Single Core AEXF Cable을 절연재질인 나무판 위에 가로 400mm, 세로 50mm 간격을 유지하도록 Fig. 2와 같은 형태로 고정시켰다.

①~③은 피복을 벗겨내고 열전대를 부착하여

전선 심선부의 온도를 측정하였고, ④~⑤는 전선 피복부의 온도를 측정 하였으며, ⑥의 위치에서는 대기 온도를 측정하였다. 전기저항 발열 시험을 위해 단면적 0.3, 0.5, 0.85, 1.25, 2.0 mm²인 전선의 끝단에 1,800초 동안 5, 10, 15, 20A의 전류를 각각 통전하여 온도 변화를 측정하였다. 발열 시험 결과 심선부와 피복부에는 비교적 근소한 차이를 보이므로 실험 및 해석의 비교 검증에는 심선부의 결과를 사용하였다.

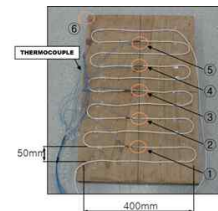
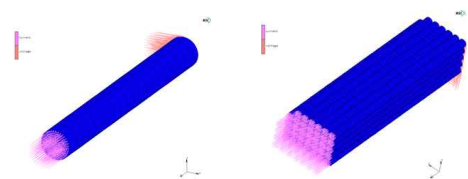


Fig. 2 Electrical resistance heating test of stranded conductors

3. 단선과 연선의 전기저항 발열 해석 및 등가저항법 적용 발열해석 결과

동일한 2.0 mm² 단면적을 가지는 단선과 연선에 대해서 Fig. 3과 같이 한 가닥의 통구리선으로 구성된 모델(Solid conductor model)과 여러 가닥으로 구성된 모델(Stranded conductor model)을 이용하였고, 도체는 순수 구리로 가정하였다. 해석에 사용된 구리의 물성값 및 대류열전달 계수는 Table 1과 같다.

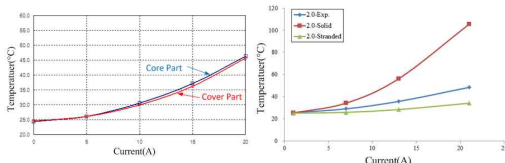


(a) Solid conductor model (b) Stranded conductor model
 Fig. 3 FE Model of solid and stranded conductor

Table 1 Properties of Copper

Density (kg/m ³)	Resistivity (Ω·mm)	Specific Heat (J/kg)	Thermal Conductivity (W/mm-K)
8.96E-6	1.8333E-5	0.385	385
Length of wire (mm)	Area of wire (mm ²)	Convection Coefficient Air (W/mm ²)	
20	0.309	1.0E-5	

Fig. 4는 시험과 해석결과를 보이고 있는데, 단선의 해석 결과가 연선의 실험에 비해 상당히 높은 열이 발생하는데 이는 전선의 표면적이 적어 대류에 의한 열교환이 부정확하기 때문으로 판단되며 연선 해석결과가 실험 결과보다 낮은 온도를 보이는 이유는 전선끼리 접촉되는 부분의 접촉저항 발열이 고려되지 않기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Experiment (b) Experiment & Simulation
Fig. 4 Experiment & FE Analysis of Electric Wire

유한요소해석으로 전선의 발열 현상을 모사하기 위해서 전선의 피복과 접촉저항을 고려하여 모델링하면 모델이 대형화되고 복잡해지기 때문에 등가저항을 이용한 해석 기법을 제안하였다.

$$Q = Q_w + Q_{CR} = I^2 \cdot R_{eq} \quad (1)$$

여기서,

$$Q_w = I^2 \cdot R_w$$

$$Q_{CR} = A_C \cdot R_{CR} \cdot I^2$$

$$R_{eq} = R \cdot \eta$$

$$\eta = T_{exp} / T_i$$

- Q_w : Heat flux by wire resistance(W/mm²)
- Q_{CR} : Heat flux by contact resistance(W/mm²)
- Q_C : Heat flux by convection(W/mm²)
- I : Current(A)
- A_C : Contact area(mm²)
- R_{CR} : Contact resistance(Ω·mm)
- Req : Equivalent resistance(Ω·mm)

- T_i : Evaluated temperature(°C)
- η : Correction factor

등가저항 모델에서는 전선을 단선으로 가정하여 해석 모델을 구성하고 식(1)과 같이 표현되는 등가저항을 실험결과에 일치하는 온도결과가 나오도록 최대전류량에 대해서 Iterative Method를 이용하여 구하고, 이를 나머지 전류값에 적용하였다. 이 결과를 Fig. 5에 보였으며 실험과 해석이 잘 일치하는 경향을 보이므로 다른 두께의 전선에도 적용하였다.

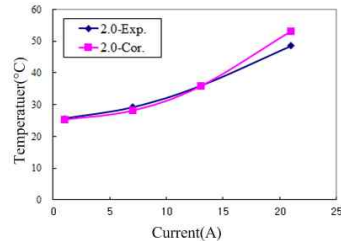


Fig. 5 FE analysis and test of 2.0 mm² cross-section conductors

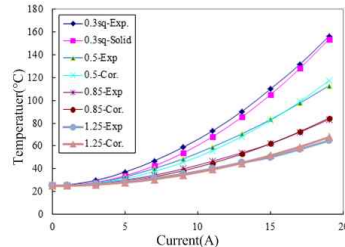


Fig. 6 FE analysis and test according to cross-sections

4. 결론

전선의 전기저항 발열을 전산해석으로 모사할 수 있는 등가저항법을 이용한 해석 기법을 만들고, 이를 발열 시험과 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였으며, 다양한 단면적에 대해서도 실험과 잘 일치하는 경향을 보이는 것으로 확인하였다. 이를 토대로 향후 터미널, 커넥터 등 전자 부품의 설계 및 해석에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Hong-Seok, Oh., "A Study on the Thermal Analysis of Fire-Resistance Cable using FEM", Trans. KIEE. Vol. 53B, No. 5, MAY, 2004.
2. MSC. Marc and Mentat User's manual Version 2010