

유한 요소법을 이용한 저압 배전용 전선퓨즈의 I-t 특성 해석

(An Analysis of the I-t Characteristic of Low Voltage Distribution Line Fuse Using the FEM)

황명환* · 박두기** · 이세현** · 한상옥**

(Myung-Whan Hwang · Doo-Ki Park · Sae-Hyun Lee · Sang-Ok Han)

요 약

본 논문에서는 저압 배전용 전선퓨즈의 I-t 특성을 다루었다. 전선퓨즈 엘리먼트는 과전류 영역을 담당하는 낮은 온도 용융영역(LTME)과, 대전류 영역을 담당하는 높은 온도 용융영역(HTME)으로 나누어 진다. 이들 부분에 의하여 퓨즈의 용단특성이 결정되는 것이다. 따라서 이들 부분에 대한 열적, 전기적인 특성을 시뮬레이션 하므로써, 퓨즈 엘리먼트 설계의 타당성을 이론적으로 검증하였다. 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 전선퓨즈의 I-t 특성을 시뮬레이션 하였다. 그리고, 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교해 보았을 때 대전류영역과 소전류영역에서의 상당히 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract

In this paper, we deal with the I-t characteristic of low voltage distribution fuse(line fuse). That fuse element has two parts; One is low temperature melting element(LTME) to put up with over current and the other is high temperature melting element(HTME) which put up with large current. Melting characteristic of fuse is determined by LTME and HTME. So we verified their properties of fuse design, mathematically, by simulating the thermal and electric characteristics of each other. We simulated the I-t characteristic of line fuse by using the numerical method; Finite Element Method(FEM). Then, we could acquire very similar result at the HTME and LTME area when compared the simulation result with experimental one.

1. 서 론

현재 국내에서 사용되고 있는 퓨즈는 외국의 이론

적 설계 근거와 실험의 결과로서 얻은 자료를 바탕으로 제작되어 사용되고 있는 실정이다. 따라서 국내에 퓨즈에 대한 이론적 설계 근거가 거의 없는 상

*정회원 : 국립기술품질원 전기과
접수일자 : 1997. 4. 29

**정회원 : 충남대학교 공과대학 전기공학과

태이므로, 새로운 전력수요의 변화에 대한 능동적인 대체가 어렵다. 그래서, 국내에서는 변화하는 상황에 맞추어 퓨즈 설계를 변경하고자 하였을 때 이론적 검증보다는 퓨즈 설계자들의 경험적인 입장에서 판단한후 많은 반복 검증실험을 통해 특성에 맞는 퓨즈를 개발하고 있다. 따라서 시간적, 경제적으로 막대한 손실이 퓨즈 개발시에 발생되고 있다.

본 논문에서는 원하는 특성을 갖는 퓨즈의 적절한 설계를 위하여 電磁場 수치해석 기법인 유한요소법(Finite Element Method)을 설계단계에서 도입한후 기본특성을 시뮬레이션 하여 실험결과와 비교 분석하였다. 이로서 시뮬레이션으로 미리 검증된 특성곡선을 얻으므로 인해 개발시험의 횟수를 줄이고 퓨즈 설계 기술의 이론적 정립과 함께 퓨즈개발에 있어서 막대한 시간적, 경제적 손실을 줄일 수 있었다.

특성의 비교를 위해 실제 배전계통에서 사용되고 있는 전선퓨즈들 중에서 2.6(Ø) 전선에 정격전압 220[V], 정격전류 38[A]의 전선퓨즈를 사용하였다.

2. 퓨즈 특성

2.1 용단특성

퓨즈에 과전류가 흘렀을 때 그 전류의 크기에 따라 용단시간이 결정되고 각종 퓨즈의 고유특성을 나타낸다. 이 용단시간과 용단전류와의 관계를 나타낸

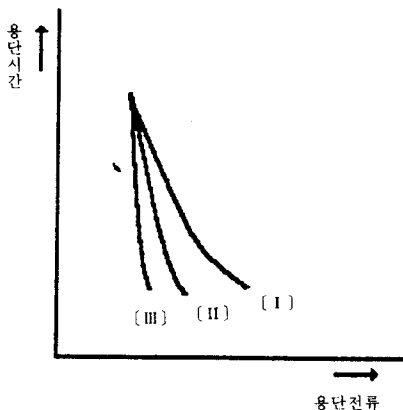


그림 1. 용단특성 곡선
Fig. 1. Melting Characteristics Curve

것을 용단특성이라고 한다. 퓨즈의 용단특성에는 그림 1에서 보인 것처럼 세 곡선으로 대표되는 세 종류가 있다.

곡선(I)은 전동기 보호용에 적합한 Time-lag형, 곡선(II)는 배선용으로 전선과 케이블에 적합한 보통용단형, 곡선(III)은 반도체보호와 백업보호에 적합한 속단형이다[1].

2.2 시간-전류 특성

퓨즈에 정해진 조건하에서 전류를 흘렸을 때의 퓨즈의 동작시간(용단시간 또는 차단시간)과 전류의 관계를 말한다. 전류를 횡축, 시간을 종축으로 표시한다. 이특성에는 용단시간 전류특성, 동작시간 전류특성 및 허용시간 전류특성의 3종류가 있다.

2.2.1 용단시간-전류특성

퓨즈에 전류가 흐르기 시작하면서부터 퓨즈 엘리먼트가 용단되기까지의 전류와 시간의 관계를 나타내는 특성으로, 이 특성을 결정하는 것은 엘리먼트의 조성, 형상, 크기이다. 전류의 평균값으로 표시하고 그 분산은 전류축에서 $\pm 20(\%)$ 이내라는 것이 규정되어 있다.

2.2.2 동작시간 전류 특성

정격전압이 인가된 상태에서 퓨즈에 과전류가 흐른 시점에서부터 퓨즈 엘리먼트가 용단, 발호되어 아크가 완전히 소호될 때까지의 시간과 전류의 관계를 나타낸 것이다. 동작특성은 분산을 고려한 동작시간의 최대값을 표시한다.

2.2.3 허용시간 전류특성

정해진 조건하에서 통전되었을 때 퓨즈 엘리먼트를 열화시키지 않고 통전되는 전류와 시간을 나타내는 특성이다. 일반적으로 용단특성의 전류축을 일정한 비율로 저감시켜 그은 특성곡선을 허용시간 전류특성으로 사용하고 있다.

그림 2에 용단시간 전류특성곡선, 동작특성곡선 및 허용시간 전류특성곡선의 상호관계를 보여준다 [1].

이중에서 본 논문에서는 용단시간-전류 특성을 다루었다.

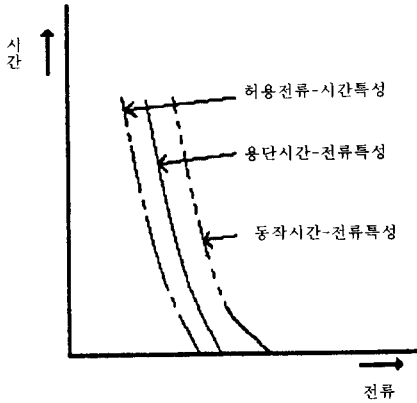


그림 2. 종류별 시간-전류 특성곡선
Fig. 2. Time-Current Characteristics Sorts of Curves

3. 수치해석에 의한 지배 방정식

전도고체의 열흐름에 대한 지배 미분방정식은 다음과 같다.

$$\text{div}((-\lambda) \cdot \text{grad}T) + \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \eta \quad (1)$$

전류의 Laplace 방정식은 다음과 같다.

$$\text{div}J = \text{div}(k \cdot \text{grad}\phi) = 0 \quad (2)$$

(1)식의 좌변 첫번째 항은 열전도에 의한 열손실을 나타내는 항이고, 두번째 항은 엘리먼트에 축적되는 열이다. 우변의 항은 엘리먼트에 공급되는 열을 나타낸다.

여기서

λ : 열전도도(thermal conductivity), T : 온도(temperature), t : 시간(time), c : 비열(specific heat), k : 전기 전도도(electrical conductivity), J : current density vector, ϕ : electrical potential

방정식 (1)과 (2)의 결합(coupling)은 다음식과 같이 표현되는 주울열(joule heating)에 대한 표현으로 주어진다.

$$\eta = \frac{1}{k} \cdot J^2 \quad (3)$$

여기서 η 는 체적당 발생하는 열이다[2~4].

전선퓨즈는 대칭적인 형상으로 나눌 수 있으므로 전체의 1/2 영역을 해석하였다.

유한요소 정식화

온도에 대한 지배방정식에 대한 해를 구하기 위하여 온도 $T^{(e)}$ 는 좌표와 시간에 대해서 함수이므로

$$\begin{aligned} T^{(e)}(r, z, t) &= \sum_{i=0}^i \cdot N_i(r, z)T_i(t) \\ &= [N]\{T\}^{(e)} \quad (4) \\ (N_i: \text{가중함수}) \end{aligned}$$

가 된다[5].

요소 Matrix방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int N_j \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right. \\ \left. + q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} r dr dz = 0 \quad (5) \\ (j=1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

이므로 경계조건을 대입하면

$$\begin{aligned} \int [K \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial N_i}{\partial r} + K \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} - q N_i \\ + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i] r dr dz + \int (h(T - T_0) + q) N_i ds = 0 \quad (6) \end{aligned}$$

가 된다.

식(6)의 온도 T 에 대한 해를 구하기 위해서 식(4)를 대입하면 다음과 같은 요소 matrix 방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned} \int \left\{ K \left(\frac{\partial}{\partial r} [N]\{T\}^{(e)} \frac{\partial N_i}{\partial r} + k \frac{\partial}{\partial z} [N]\{T\}^{(e)} \right. \right. \\ \left. \left. - q N_i + \rho c \frac{\partial}{\partial t} [N]\{T\}^{(e)} N_i \right\} r dr dz \\ + \int (h[N]\{T\}^{(e)} - T_0) + q) N_i ds = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

또는

$$\begin{aligned} [[K_e]^{(e)} + [K_h]^{(e)}] \cdot \{T\}^{(e)} + [C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}^{(e)} \\ - \{q_i\}^{(e)} + \{q\}^{(e)} - \{hT_0\}^{(e)} = 0 \quad (8) \end{aligned}$$

여기서 각 계수는 문헌[5]에 나타나 있다.

4. 시료 및 실험방법

4.1 시료선정

본 논문에서 사용된 시료는 실제 배전계통에서 사용되고 있는 전선퓨즈들 중에서 전선의 굵기 2.6 [Ø], 정격전압 220[V], 정격전류 38[A]의 퓨즈이다. 전체 단면도는 그림 3에 나타내고 있다. 엘리먼트 부분과 엘리먼트를 둘러싸고 있는 봉규산 유리와의 외부는 폴리카보네이트 재료로써 둘러싸였다. 이들 튜브는 투명하게 되어 있어 퓨즈가 동작이 되었는지를 외부에서 식별할 수 있는 것이 본 시료의 특징이다.

전류가 낮은 부분에서는 가용체 부분에서 용단이 되고 높은 영역에서는 가용체 핀에서 동작하도록 퓨즈가 설계되어 있다.

이들 부분의 전기적 및 열적특성에 대한 물성이 특성해석에 있어서 결정적인 역할을 하므로 문헌에 근거한 자료를 표 1에 나타냈다.

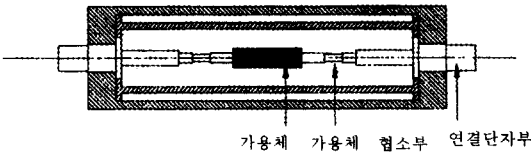


그림 3. 전선퓨즈의 단면도
Fig. 3. Cut out View of Line Fuse

표 1. 부분별 물성 data[6, 7]

	용단부	속단부
density [g/cm ³]	8.42	8.75
specific heat [J/kg · K]	150	380
melting point [°C]	185	1025
iso-k [W/m/degreeel]	50	119
R.oCp [J/m ³]	0.126E7	0.332E7
rad-R	0.023	0.023
iso-ρ [n · Ωm]	145	64

4.2 실험방법

4.2.1 시뮬레이션 조건

입력전류는 퓨즈의 용단곡선에 사용된 입력전류의 RMS를 통하여 구한 전류를 경계면 current in에다

설정해 주었다. current out면은 전위가 0으로 되게 했고, 나머지 부위는 자연 경계조건을 주었다. 열계에서는 자체의 열원이 없고 전기전도에 의해서 열이 발생하므로 자연 경계조건을 주었다. 시뮬레이션에 있어서 각시료의 물리적 상수는 표1을 이용했다.

전선퓨즈의 대칭적인 형상때문에 1/2만 해석했다. 부하전류가 위쪽 측면에 인가됐고, 아래쪽에는 전위가 0으로 되게 했다. 주위의 온도는 20[°C]로 유지했다. 열전도도(thermal conductivity)가 본 해석에서 주된 역할을 한다.

전류에 의한 발열은 엘리먼트에 의한 것이므로 해석의 대상에는 슬리브영역을 생략했다.

본연구에서 이용된 해석 프로그램은 flux2d[8] 전·열계 해석 프로그램을 사용하였다. FEM의 일반적인 구성과 같이 Pre-processor -> Main processor -> Post processor로 나누어 구성됐고, Pre-processor에서는 CAD프로그램과 호환성이 되어 있다. 해석 프로그램은 586PC, RAM 32M에서 수행됐다.

유한요소법을 효과적으로 적용하기 위하여 요소를 최적으로 분할 하여야 하는데 본 연구에서는 Delaunany법으로 초기 요소를 발생시키고 용단부(LTME)와 속단부(HTME)에 있어서는 더 많은 요소로 나누어 전·열계를 해석하였다.

전체의 element수는 1326개로서 시스템 방정식을 구성시켰다.

사용가 배전기자재 구매 시방서에는 정격전류의 180[%], 300[%], 700[%]의 용단시험을 하게 되어 있다. 그러나 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하기 위하여 부분별로 더 세부적으로 나누어서 Case by Case로 비교하여 분석하도록 하기 위하여 용단부 영역에서는 정격전류의 180, 200, 225, 275, 300, 400, 500, 600, 700[%]와 속단부 영역에서는 3 [kA]의 차단전류에 의해 시뮬레이션과 실증실험을 행하였다.

4.2.2 실험장치의 구성 및 설치

실제 실험장치는 모델 Multi-Amp CB 8130의 시험기를 이용하여 설정된 전류를 인가하여 시험하였다. 이 장비 특징은 100[kA]의 전류를 10[cycle]

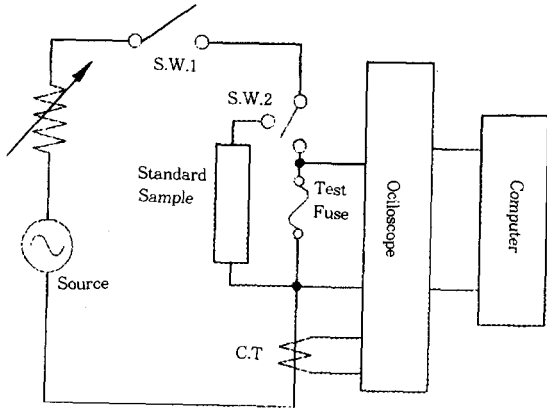


그림 4. 실험장치 회로도
Fig. Circuis diagram of Experimental device

이내에서 공급할 수 있으며, 60(kA)로 연속전류의 공급이 가능하다. 실험장치의 구성은 그림 4와 같다.

5. 결과 및 고찰

각각의 전류에 대하여 시뮬레이션한 결과와 실험 결과를 살펴보면 다음과 같다. 그림 5는 전류가 266 [A]가 흐를 때 시간에 따른 등열선의 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 짧은 시간영역에서는 협소부의 반경이 용단부보다 작기 때문에 이곳에 발생하는 열이 높게 나타나는 것이다. 그러나 시간이 흐름에 따라 주위로 전도 되어져 가는 현상을 고찰할 수 있다.

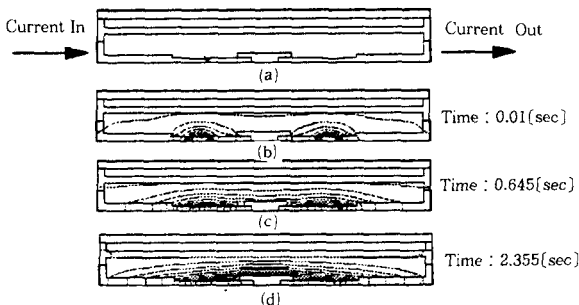


그림 5. $I=266[A]$ 일 때 시간에 따른 등열선의 변화
Fig. 5. Changing of Equi-thermal Line by the Time varying at $I=266[A]$

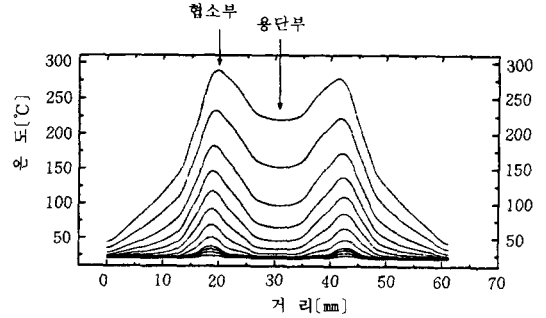


그림 6. $I=266[A]$ 일 때 엘리먼트 거리에 의한 온도분포
Fig. 6. Thermal distribution by the Element Length at $I=266[A]$

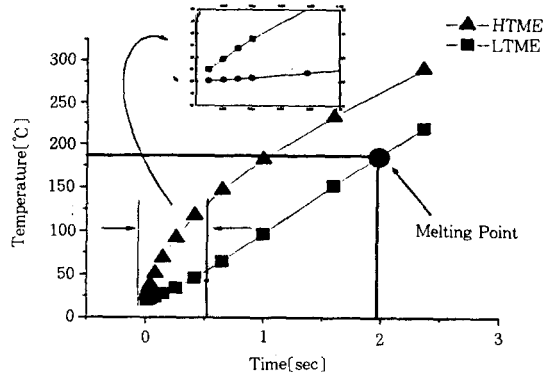


그림 7. $I=266[A]$ 일 때 시간에 따른 온도변화
Fig. 7. Change of Temperature by Time Varing at $I=266[A]$

그림 6은 엘리먼트에 대해 전류가 들어오는 부분 으로부터 전류가 나가는 부분까지의 온도 변화를 엘리먼트 길이에 따라 나타내었다. 협소부의 온도가 용단부에 비해서 현격히 올라가고 있다.

엘리먼트부분의 온도변화에 대한 물리적 고찰을 하기 위해 그림 7은 그림 6에서 최고 온도만을 시간 변화에 따라서 다시 나타낸 그림이다. 0.5(sec)이하의 부분을 확대하여 보면, 협소부의 온도상승이 훨씬 커짐을 알 수 있다. 협소부에 사용되는 재질의 용융 점은 1,025[°C]로서 온도 기울기는 크지만 용융점에 이르지 못하는 것을 나타내고 있다. 그러나 용단부에 사용되는 재질은 185[°C]에서 용융이 되게 만들었기 때문에 온도변화는 협소부에 비해서 낮지만 같은 시간 동안에 벌써 용융에 도달하여 용단되었다.

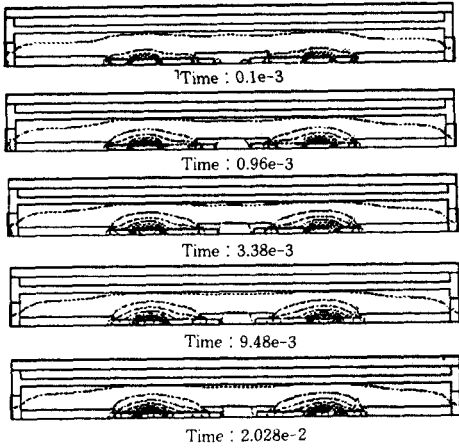


그림 8. I=3000[A]일 때 시간에 따른 등열선의 변화
 Fig. 9. Changing of Equi-thermal Line by the Time varying at I=3000[A]

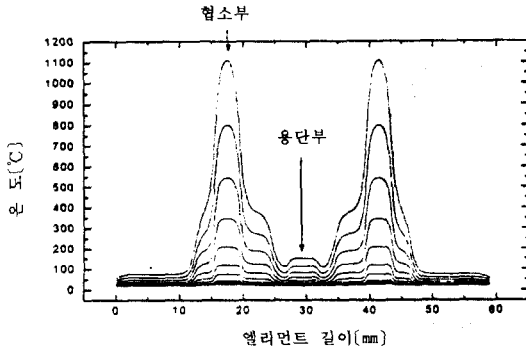


그림 9. I=3000[A]일 때 엘리먼트 거리에 의한 온도분포
 Fig. 9. Thermal Distribution by the Element Length at I=3000[A]

그림 8, 9, 10은 3,000[A]의 전류를 인가 했을 때의 변화를 나타낸다. 인가된 전류가 크기 때문에 매우 짧은 시간에 변화가 일어남이 관측된다. 등열선의 변화도 협소부에 상당히 높은 온도가 발생되어 축적되지만 열의 전도가 미소하게 일어난다. 협소부와 용단부의 시간에 따른 온도변화에 대한 물리적인 고찰을 해보면 협소부에서 짧은 시간동안 온도상승 기울기가 훨씬 커 용융점에 이르렀지만 용단부에는 아직도 용융점에 도달하지 않았다.

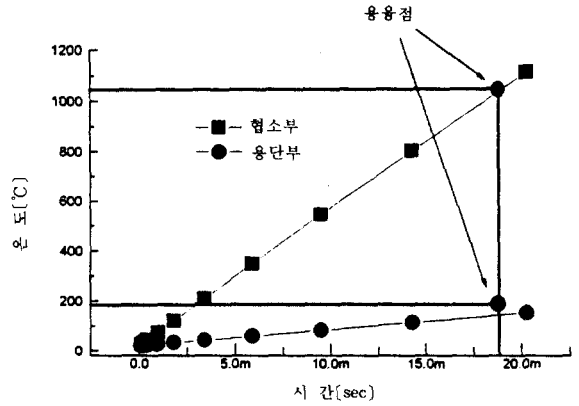


그림 10. I=3000[A]일 때 시간에 따른 온도변화
 Fig. 10. Change of Temperature by Time Varing at I=3000[A]

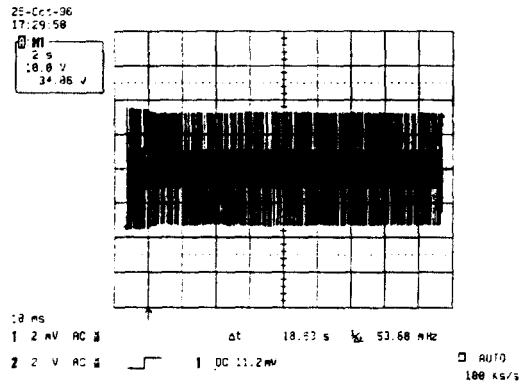


그림 11. I=114[A]일 때 용단오실로그래
 Fig. 11. Melting Oscillogram at I=114[A]

이로서 낮은 전류에 의한 온도변화와 높은 전류에 의한 온도변화를 수치적 해석에 의해 전선퓨즈의 I-t특성을 해석할 수 있었다.

그림 11은 여러 전류들 중에서 114[A]일때 측정 한 결과의 오실로그래이다. 1[div]당 50[sec]로 측정되었다. 전류가 인가되면서 용단까지의 real time 을 측정 한 결과 18.63[sec]가 된다. 이 시간을 퓨즈의 용단시간으로 취급하였다.

그림 12는 시뮬레이션의 결과와 실제 실험의 결과를 비교한 I-t특성곡선이다. 한 전류당 5번의 측정 결과에 대하여 평균을 내 그래프와 비교하였다.

여기서 100[A]이상의 높은 전류영역에서는 0.17~0.2배의 오차가 발생하며 100[A] 이하의 낮은 전

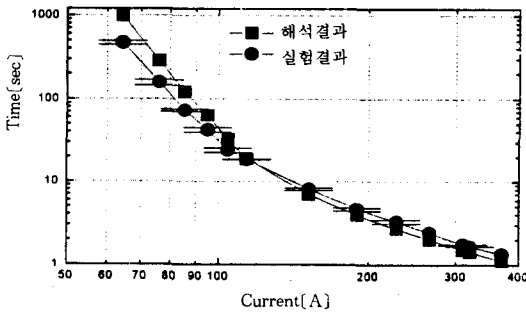


그림 12. 실험과 시뮬레이션에 의한 용단곡선의 비교
Fig. 12. Comparison Melting Curve of Simulation with that of Experiment

류 영역에서는 1.5~2.1배의 오차가 발생하지만 실제와 유사한 특성을 얻을 수 있었다.

6. 결 론

Ø2.6, 정격 220[V], 38[A] 용 전선퓨즈에 대하여 수학적 해석을 통하여 얻은 용단곡선, 차단특성의 해석과 실제 실험결과를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전류에 의한 HTME와 LTME의 시간에 따른 열적인 변화를 확인할 수 있었다.
2. 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교해 보았을 때 퓨즈의 용단특성은 소전류 영역에서는 2.1배, 대전류 영역에서는 0.2배 이내의 오차를 갖고 있다.
3. 수리적인 퓨즈 특성해석을 통하여 얻은 결과로 차후 유사한 모델의 대전류 전선퓨즈 개발에 이용이 가능하다. 이것은 전선퓨즈 개발을 위한 시간과 경제적 손실 부담을 줄일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] "저압회로의 단락보호", 전기기술, pp.20~21, Vol.29, No.7, 1992. 7
- [2] 박두기, 이세현, 한상욱 외 6명, "퓨즈 엘리먼트의 형상에 따른 온도분포 해석", 대한 전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.1688~1690, 1996.
- [3] "25[kV]급 밀폐형 Cutout Switch개발(중간보고서)", 한국전력공사, 1996. 9
- [4] M.Lindmayer and M.Luther, "Fusing and Short Circuit

Interruption Behaviour of Metal Film Fuses", pp.107~113, ICEFA, 1991.

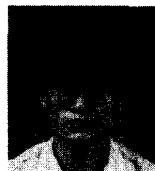
- [5] "설계 검증을 위한 전계 및 열계 해석(중간보고서)", 한국전기연구소, 1992. 11.
- [6] "Metals Handbook-10th Edition", Properties and Selection: Nonferrous Special-Purpose Materials
- [7] E.A Brandes and G.B.Brook, "Smithells Metals Reference Book"
- [8] 이기식, 최홍순, "상업용 소프트웨어의 분석", 전기학회지, pp.25~31, 1996.2

◇ 著 者 紹 介 ◇



한 상 옥(韓相玉)

1946년 5월 12일 생. 1974년 충남대학교 전기공학과 졸. 1978년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸(석사). 1986년 이하대학교 대학원 전기공학과 졸(박사). 1989~90 일본나고야대학 교환교수. 현재 충남대학교 공과대학 전기공학과 정교수.



이 세 현(李世鉉)

1967년 1월 10일 생. 1992년 충남대학교 전기공학과 졸. 1994년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 충남대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



박 두 기(朴斗鎬)

1969년 9월 1日生. 1995년 충남대학교 전기공학교육과 졸. 1997년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸(석사). 현재 충남대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



황 명 환(黃明煥)

1955년 2월 10日生. 인하대학교 전기공학과 졸. 1983년 일본대학 대학원 전기공학과 졸(석사). 1987년 동대졸(박사). 1988년 일본대학교 이공학연구소. 1989년 일본 노동성산업안전연구소. 1990년 인천대학교. 1997년 중소기업청 국립기술품질원.