

탄소나노튜브 가용체 초소형 퓨즈의 한계 전류 특성

노성여¹, 진상준², 이선우³ 

¹ 동명대학교 항만물류시스템공학과

² 스마트전자 종합연구소

³ 인하공업전문대학 전기정보과

Limited Current Characteristics of Carbon Nanotube Elements Miniature Fuses

Seong Yeo Noh¹, Sang Jun Jin², and Sunwoo Lee³

¹ Department of Port Logistics System, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

² Development Team, SMART Electronics Inc, Ulsan 44956, Korea

³ Department of Electrical Information, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

(Received November 14, 2019; Revised November 26, 2019; Accepted November 28, 2019)

Abstract: In this paper, we prepared miniature fuse fabricated with carbon nanotube (CNT) fiber for the use of low rated current under 1 A and high speed operation under 4ms. CNT fuses were fabricated in the form of universal modular fuse (UMF) with different diameter of CNT fibers defined by multiplying the CNT threads. Electrical properties of the CNT fuses were measured such as resistance, rated current, and operation time with current. Resistance of the CNT fuse decreased and rated current increased with the diameter of the CNT fuses, respectively. Consequently, the operation time with current increased with the diameter of the CNT fuses. The CNT fuses fabricated in this work had broad range of low rated current from 0.05 to 1.25 A by multiplying the CNT threads. Operation time was measured about 3.6ms which was applicable to the UMF.

Keywords: Fuse, Carbon nanotube, Universal module fuse, Low rated current

1. 서론

최근 IT 기술 발전으로 인한 네트워크 기반의 휴대용 전자 제품이 큰 시장으로 자리 잡으며, 소형 고밀도 부품과 기능 집적 반도체 IC의 성능 중요성이 강조되고 있다. 이와 같은 휴대용 전자 제품의 기술 트렌드는 제품의 유지 보수와 보호를 위한 설계에도 영향을 미치는 추세이고, 이는 기존 전기전자 기기의 고장 방지 대상이 제품 전체였던 것과 달리 주요 부품과 핵

심 소재 요소를 보호하는 안전 설계가 강조되는 최근 제품에서 확인할 수 있다 [1]. 즉 전기기기에서 주요 부품과 집적 IC 반도체가 이상전류나 이상전압으로부터의 고장을 피할 수 있으면 장기간 유지 보수하여 사용할 수 있기 때문에 핵심 요소 보호에 대한 중요성이 강조되고 있다.

일반적으로 전기기기에서 안정적이고 일정한 전류와 전압은 기기의 정상동작에 필요한 필수 조건이지만, 환경적 요인과 부품 오동작, 요소 단락 등으로 인해 전류와 전압의 이상 상태는 언제든지 발생할 수 있는 위험 요소이다. 이 중 전기기기에서 발생하는 이상전류는 대부분 회로 내부에 발생한 단락과 아크, 부품 고장 등에 인한 것으로, 이때 전체 회로 저항의 변화는 유입 되는 전류를 변화시킨다 [2]. 과전류 보호소자(over

✉ Sunwoo Lee; nsy@tu.ac.kr

current protector)인 퓨즈는 이런 전기기기의 내부 혹은 외부의 요인에서 시작된 과전류를 가용체의 용단으로 차단해 보호하는 소자이다. 전기기기의 입력 1차측에서 기기 전체를 보호하는 제품의 메인 퓨즈는 회로 전체가 사용하는 입력 전류에 의해 퓨즈의 정격전류가 결정되며, 보통 소형 전자 제품의 경우 1~15 A, 대형 전기 설비와 시스템, 전기자동차 등의 경우 20~500 A 메인 퓨즈가 사용된다. 반면, 회로 전체의 보호보다는 요소 부품과 직렬로 연결되어 미세한 전류변화에 의한 핵심 부품을 고장에서 보호하는 2차측 퓨즈의 경우 메인 퓨즈보다 상대적으로 낮은 정격전압과 정격전류로 이상전류 발생 시 빠른 동작 특성을 요구한다.

기기 전체의 입력 전류보다 상대적으로 적은 양의 전류를 사용하는 요소 부품을 보호하기 위해서는 1 A 이하의 낮은 전류에도 동작하여 차단할 수 있는 퓨즈가 필요하지만 일반적인 금속 가용체를 사용하는 초소형 퓨즈는 0.5 A 이하의 보호가 어려운 실정이다 [3]. 때문에 현재 0.5 A 이하의 낮은 정격전류 퓨즈는 저용점 금속을 활용한 온도 퓨즈 계열의 보호 체계를 적용하고 있지만 과전류 발생에 대한 한계 전류형(이하: 한류형) 동작을 구현하기 어려워 과전류에 대한 완전한 보호 체계라 할 수 없다.

이에 본 연구에서는 기존의 합금 대비 유사한 전기전도성을 유지하며 비교적 낮은 전류에도 동작이 가능하고 완전 단락 돌입 전류에도 동작시간이 짧아 폭발 특성과 동작소음을 저감할 수 있는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT) 소재를 이용한 저전류용 초소형 퓨즈의 설계 방법을 제시하였다.

2. 실험 방법

설계된 CNT 가용체 퓨즈는 낮은 이상전류에도 빠르고 안전한 동작을 구현하기 위해 밀폐형의 퓨즈 구조와 전기기기 제어 회로 위에서 가장 적은 공간을 차지하여 설계에 영향을 최소화하는 UMF 퓨즈(universal modular fuse)를 대상으로 실험을 실시하였다. 일반적으로 사용되는 UMF 퓨즈는 $2.8 \times 2.8 \times 6.1$ mm³ 직육면체의 형상으로, 구조는 유지하면서 동작의 민감성을 유지하기 위하여 내부 구조와 형상을 그림 1과 같이 제작하였다.

퓨즈 엘리먼트의 형상은 탄소나노튜브 형태로 고정하였고 선경은 목표 정격전류에 따라 CNT 와이어를 겹치는 형태로 하여 정격전류 대조군을 두었다. 치수는 세라

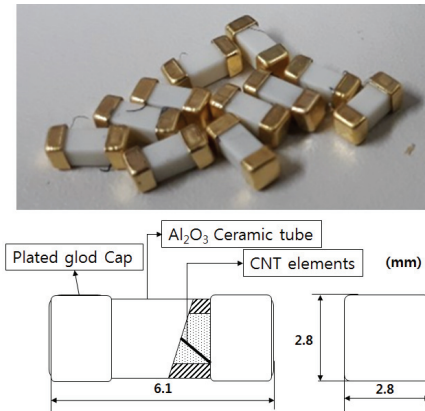


Fig. 1. Structure of CNT elements fuse sample.

믹 튜브의 대각에 삽입하여 모든 와이어가 6.7 ± 0.3 mm 이내의 길이를 가지도록 시료를 제작하였다.

실험은 CNT 와이어의 겹침 횟수에 따라 샘플을 제작하여 모든 시료의 불량 단선 여부 등을 확인하였다. 각 시료군은 최소 20개 이상의 예비 시료를 확보하고 모든 시료의 전기저항을 측정하고 시료 세라믹 튜브에 기록하였다. 이후 파워 서플라이를 사용하여 전기적 특성 실험을 실시하였고, 전류에 따라 동작되는 시간을 분석하여 시험 결과를 도출하였다. 동작 실험 간 파워 서플라이 전류는 ICE60127-1에 정의된 DC 정전류에서 변동 전압이 60 V 이내가 되도록 유지하였다. 실험은 파워서플라이 BOB사 SGI 330/150, 오실로스코프 Tektronix사 DPO 3022, 저항계측기 Hiyoki사 3.227 m Ω Hitester를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2에 CNT로 제작된 퓨즈가 전기기기에 대한 설계의 영향을 최소화하기 위한 저항 값과 정격전류 산정에 따른 전압강하 값을 측정하였다. IEC 60127-4에 명시된 전압강하 기준에 따라 낮은 차단용량 제품 0.1~0.2 A의 퓨즈는 정격전류 통전에 대하여 1.3 V 이하의 전압강하를 유지해야 하며 이는 “보호소자는 단지 보호의 역할만 수행할 것”을 명시한 규격적 정의에 의한 것이다 [4]. 하지만 아직 규격상 높은 차단용량에 대한 전압강하 값은 재정되지 않아 높은 차단 용량은 규격을 따르지 않아도 무방하다.

전압강하와 저항 측정의 결과로부터 제작된 퓨즈는 모두 전압강하 값이 9 V 이상으로 통전 전류에 대한

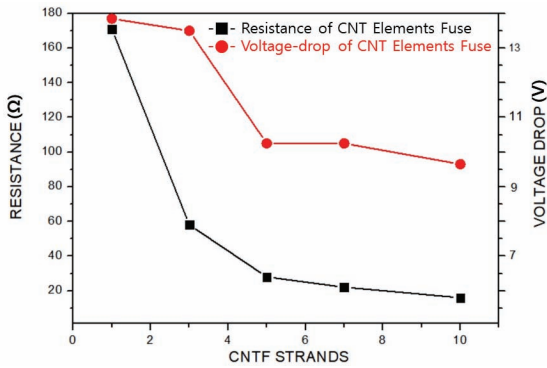


Fig. 2. Test result of resistance and voltage drop.

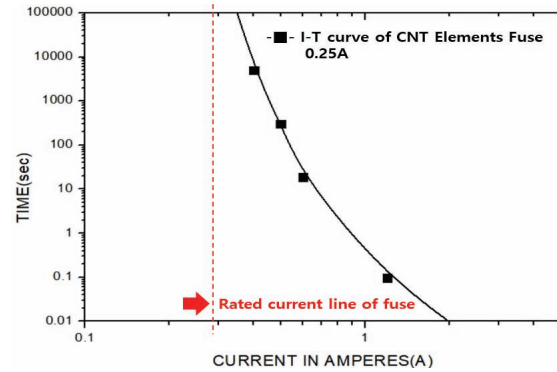


Fig. 3. I-T curve of 0.25 A CNT elements fuse.

전력 소모를 최소한으로 유지하는 조건은 만족하지 못한다고 판단할 수 있다. 때문에 퓨즈의 동작특성은 빠른 동작형 혹은 매우 빠른 동작형으로 설계되어야 하고 이는 돌입 전류가 발생하지 않는 전기기기 회로의 2차측에 적합한 동작 특성이다.

일반적으로 퓨즈의 지연 동작 특성은 전기기기의 메인 회로 1차측에서 발생하는 돌입전류에 대하여 민감한 동작으로 차단 동작이 빈번히 발생하는 것을 방지하기 위한 퓨즈의 동작 형태로 퓨즈 정격전류의 160% 이상 과전류에 동작하도록 설계된다. 반면 퓨즈의 빠른 동작 특성은 돌입전류가 발생하지 않는 회로 위치에서 정격전류의 125% 이상 과전류에 민감하게 동작하도록 설계되어 특정 요소 부품과 민감한 위치를 보호하기 적합하다.

요소 부품 보호에서 민감한 반응을 유지하기 위한 퓨즈의 동작 특성은 빠른 동작 특성 혹은 일반 동작 특성으로 구현되어야 하며, 이를 위한 CNT 가용체 초소형 퓨즈 동작 특성을 0.25 A 대표 정격 시험을 통해 그림 3의 I-T 커브로 나타내었다.

그림 3의 결과로부터 CNT 가용체의 한계 전류를 나타내는 정격전류 선은, 전류 인가를 통해 용단이 발생하지 않는 최대 전류와 반드시 용단이 발생하는 최소 전류의 접점으로 퓨즈의 정격전류와 동일하다. 한계 전류에 영향을 미치는 전기 환경 인자는 간단한 계산을 통해 알 수 있고 퓨즈에 흐르는 전류는 에너지이며 전류상의 에너지 P는 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$P = V \times I \quad (1)$$

해당 식의 물성적 해석을 위하여 재료의 고유 물성인 저항의 범주로 전압을 유도 하면 식 (2)와 같다.

$$V = I \times R \Leftarrow R = \frac{\rho L}{A} \quad (2)$$

$$V = I \times \frac{\rho L}{A} \Leftarrow A = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$V = I \times \frac{4\rho L}{\pi D^2}$$

P: 정격전력, V: 전압, I: 정격전류, R: 가용체의 저항, ρ: 가용체의 도전율, L: 가용체의 길이, A: 가용체의 단면적, D: 가용체의 선경

식 (1)에 식 (2)를 대입하여, 불변 상수 값을 제외시키면, 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$P = I \times \frac{4\rho L}{\pi D^2} \times I / P = I^2 \times \frac{1}{D^2} / I^2 \propto D^2 \quad (3)$$

식 (3)의 결과로부터 퓨즈의 정격전류는 퓨즈 가용체의 선경에 비례하며, 이는 동종 재료의 정격전류를 상승시키기 위해서는 선경을 상승시켜야 함을 나타낸다 [5]. 이와 같이 결정된 정격전류를 기준으로 정격전류의 1,000% 인가전류에서 동작시간이 3.6ms에 동작하여, 4ms 이내에서 동작해야 하는 빠른 동작 특성을 만족함을 확인하였다. 그리고 CNT 가용체 선을 겹침에 따른 퓨즈의 한계전류 선의 이동을 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 결과로부터 CNT 가용체로 제작된 초소형 퓨즈의 정격전류는 선경이 감소한 것과 같은 CNT 가용체의 겹침 횟수가 적을수록 정격전류가 감소하였고 이는 한계전류 또한 감소한 것으로 판단할 수 있다. 이는 CNT의 선경(겹침 횟수)을 조정하여 넓은 범위의 제품군을 제작할 수 있음을 나타내며, CNT의 한계전

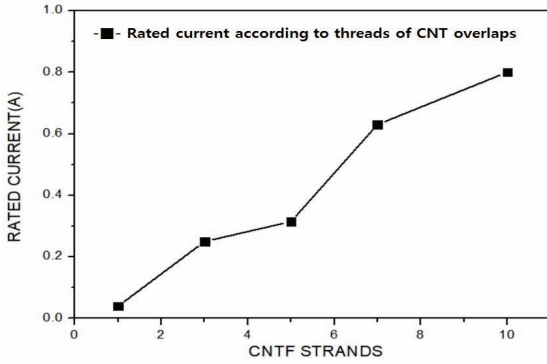


Fig. 4. Rated current according to threads of CNT overlaps.

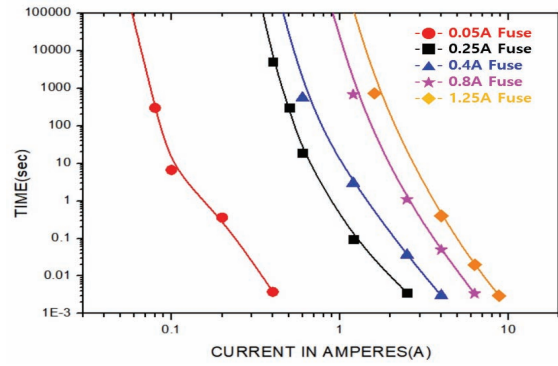


Fig. 5. I-T curve of CNTF elements UMF fuse.

류 동작 시험을 통한 전체 제작 퓨즈군의 결과는 그림 5의 I-T 커브와 같다.

전체 I-T 커브로부터 퓨즈는 한류형 퓨즈의 빠른 동작특성을 나타내어 정격전류 선의 기울기가 큰 것을 확인할 수 있고 0.05 A에서 1.25 A까지의 넓은 범위의 정격전류를 만족하여 요소 부품 보호와 미소전류 변화에서의 안전을 확보할 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

제작된 CNT 가용체 초소형 퓨즈를 대상으로 획득된 퓨즈 I-T 커브의 특성이 저전류 한류형 퓨즈로의 동작 특성을 만족하는지 확인하기 위하여 CNT 가용체를 적용한 샘플을 대상으로 내구성 시험과 차단용량 시험을 실시하였다.

정의적으로 퓨즈 가용체의 수명 내구성은 돌입 전류의 형상과 크기로 결정되는 과전류 에너지에 대한 퓨즈 가용체 I^2t 값의 비교를 통해 확인할 수 있으며 전기기 작동 시작 동작을 10만 회 이상 만족해야 10년 이상의 수명이 보장된다. 퓨즈 가용체의 I^2t 은 전류에 대한 재료의 고유 에너지 값으로, 퓨즈의 용단시간을 측정해 한계 전류에 의해 확인할 수 있지만 열의 이동으로 인한 동작시간이 지연되지 않는 영역에서도 확인 가능하다. 때문에 I^2t 값은 정격전류의 1,000% 이상의 전류가 인가된 영역에서의 용단 시간에 따라 평가할 수 있으며, 해당 영역에 I^2t 값의 단순 비교만으로 내구성을 확인할 수 있다.

그림 6의 결과로부터 I^2t 값이 표시된 수렴 구간에서 각 정격전류에 해당하는 I^2t 값이 나타나고 이 값은 일반적인 칩 퓨즈의 성능과 유사한 수준으로 돌입전류에 대한 내성이 높지 않다 [6]. 하지만 칩 퓨즈와 같이 메인 보호로써의 퓨즈가 아닌 요소 부품의 보호의 목적으로 I^2t 값은 만족하고 빠른 동작 특성 퓨즈의 내구성과 유의차가 없어 특성을 만족하고 있다.

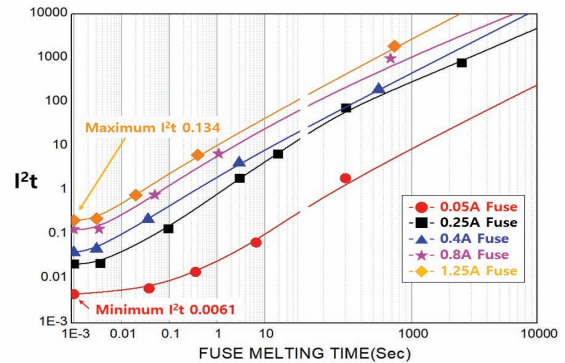


Fig. 6. I^2t curve of CNTF elements UMF fuse.

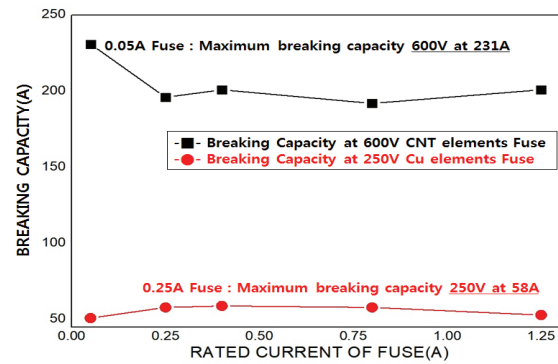


Fig. 7. Breaking capacity of CNTF elements UMF fuse.

그림 7의 결과로부터 탄소나노튜브 가용체에 의한 높은 차단 용량 상승을 확인할 수 있다. 가용체의 전기에 대한 폭발 특성을 결정하는 재료적 요인은 재료의 급격한 산화, 폭발 비산하는 재료의 양, 급격한 온도 상승에 대한 원자의 비산 속도 등으로 판단할 수 있으며, 차단용량 상승을 위하여 이상의 요인들에 대한 재료 설계가 필요하다. 이 중 높은 전류에 의해 원자

간의 결합이 파괴되어 분말 형태로 비산하는 소재의 산화를 막는 방법이 차단용량 상승을 위해 효과적이며, 때문에 산화도가 높은 순금속보다는 산화에 의한 폭발적인 반응을 줄일 수 있는 합금의 적용이 차단용량 상승 설계에 적용된다. 결과로부터 Cu 가용체가 사용된 동일한 UMF 퓨즈에 대하여 차단용량은 최대 4배가 상승함을 확인할 수 있다. 이는 금속 가용체에서 나타나는 폭발 비산현상과 급격한 산화가 발생하지 않는 것으로 판단할 수 있으며, 요소 부품을 보호하기 위한 돌입 과전류에서 안전을 확보한 것으로 판단할 수 있다.

이상의 실험을 통해 1 A 이하의 낮은 전류에도 동작하여 차단할 수 있는 요소 부품 보호용 퓨즈를 탄소나노튜브의 겹침을 통해 설계하였다. 이상과 같은 실험 결과를 바탕으로 정격전류 0.05~1.25 A까지 정격전류에 대응할 수 있는 제품군에 대한 I-T 커브를 그림 5에 제시하였고, 실험 결과로부터 넓은 범위의 저전류 정격에서 보호를 위한 동작 특성들을 만족하여 적절한 한류형 퓨즈 보호소자의 설계가 이루어졌음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전기기기 동작의 핵심이 되는 집적 회로 및 요소 주요 부품의 고장을 방지하고 안전을 확보하기 위한 요소 보호용 저전류 2차측 퓨즈에 대하여 고찰하였다. 제작된 퓨즈 CNT 가용체 일정성을 확인하기 위하여 전압강하 값과 저항 값을 측정하였으며, 설계한 퓨즈의 CNT 가용체가 양호하게 제작되었음을 알 수 있었다. 그리고 현재 일반적인 인버터 제어 회로에 적용되는 IEC 60127-4 초소형 UMF 퓨즈를 대상으로 낮은 정격전류와 빠른 동작을 보유한 퓨즈를 설계한 후 전기적 시험을 진행하였다. 실험 결과로부터 0.05~1.25 A까지 CNT의 겹침 횟수 조정만으로 넓은 저전류 범위의 정격을 확보하였고, 빠른 동작 특성을 유지하며 내구성과 I^2t 특성도 만족할 수 있었다. 그리

고 동일한 UMF 퓨즈 구리 가용체 사용 퓨즈와 비교한 차단용량 시험에서는 최대 4배 이상의 성능 상승을 확인하여 폭발 및 화재에 대하여 더 안전한 가용체 설계가 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구의 결과로부터 CNT 가용체를 사용한 저전류 퓨즈 설계는 빠른 용단과 차단용량 상승 특성 등이 전기기기의 요소부품의 고장 및 화재 폭발서 사고를 방지하는 적절한 설계가 이루어졌다고 판단할 수 있다.

ORCID

Sunwoo Lee

<https://orcid.org/0000-0003-1847-4100>

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(no.20172220200130).

REFERENCES

- [1] M. Cho, D. B. Nah, S. C. Kil, and S. W. Kim, *J. Energy Eng.*, **20**, 109 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.5855/energy.2011.20.2.109>]
- [2] E. M. Kim and C. Kang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 427 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.6.427>]
- [3] J. Paukert, *Proc. the International Conference on Electric Fuses and their Applications* (Liverpool, U.K., 1976) p. 59.
- [4] C. K. Ji and K. O. Kim, *Definitions for miniature fuses and general requirements for miniature fuse-links* (Korea Standards, Korea, 2005) p. 16. [DOI: <https://doi.org/10.3403/02644108u>]
- [5] E. M. Kim, S. H. Kim, and D. K. Cho, *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, **63**, 1538 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2014.63.11.1538>]
- [6] R. Wilkins and P. M. Mc Ewan, *Proc. the Institution of Electrical Engineers*, **122**, 285 (1975). [DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1975.0076>]