

VCTFK의 반복피로에 의한 소손 패턴의 특성 해석

최충석[†] · 송길목 · 김동우

전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)
(2004. 7. 19. 접수 / 2004. 12. 3. 채택)

The Characteristics Analysis of Damaged Pattern by Repeated Stress of VCTFK

Chung-Seog Choi[†] · Kil-Mok Shong · Dong-Woo Kim

Electrical Safety Research Institute attached to KESCO
(Received July 19, 2004 / Accepted December 3, 2004)

Abstract : In this paper, we analyzed on the characteristics of the stranded wire disconnected by repeated stress. The stranded wires that were used in the experiment are PVC insulated flexible cords(VCTFK: Vinyl Insulated Vinyl Cabtyre Cord Flat-type) of 0.75mm^2 , 1.25mm^2 , and 2.0mm^2 . They are used to connect the load in low voltage. The stranded wires disconnected by repeated stress were magnified with optical microscope. Using X-ray, the disconnected wire were photographed. we compared mechanical characteristics of the stranded wire between disconnected tendency and allowable current. On the mechanical strength of vinyl cap tire ellipse type cords under bending stress, VCTFK of 1.25mm^2 was the strongest of them. When it was bent 826.3 ± 7 times, it appeared the disconnected tendency that element wires of VCTFK of 1.25mm^2 are more about 1.67 times than element wires of VCTFK of 0.75mm^2 . In mechanical strength, VCTFK of 1.25mm^2 is higher about 1.7 times than VCTFK of 0.75mm^2 . Therefore, we found out that mechanical strength was higher, when the wire had a lot of element wires. In comparison with bending stress, VCTFK of 1.25mm^2 is the strongest among samples, and it is the most useful in wires of movable type.

Key Words : stranded wire, repeated stress, disconnecting rate, allowable current

1. 서 론

전기는 일상생활에서 필연적인 에너지로 응용되고 있으며 그에 따른 사고 발생 역시 높은 비율을 차지하고 있다. 특히 전기의 사용에 있어서 열 발생에 의해 화재로 진전되는 경우 상당한 인적 물적 피해를 유발시킨다.

2002년도에 발생한 화재는 32,966건으로 전기화재는 11,202건이며 34.0[%]를 점유하였다. 2001년도와 비교하면 건수는 941건(9[%])이 감소하였고, 인명피해는 10명(2.3[%])이 증가하였다. 또한, 재산피해는 98억 3천만 원이 증가하여 전기화재가 점차 대형화되고 있다. 전기화재는 일일 평균 약 26건이 발생하여 1.2명의 피해자와 1억 5천만 원 정도의 재

산피해가 발생한 것으로 나타났다.

2001년도 통계분석 결과 관리적 잘못에 의해 발생한 전기화재 건수는 6,119건으로 조사결과의 54.6 [%]를 점유하고 있다. 이 수치에서도 알 수 있듯이 전기사고의 대부분은 사용자의 잘못이며 이를 예방하기 위해서는 전기기기의 특성을 고려한 사용이 요구된다. 또한, 전기에너지는 다른 어떤 에너지보다 에너지 활용도가 높고 효율성이 우수하기 때문에 제어를 잘못 하는 경우 감전사고, 전기화재, 전기설비 사고 등을 유발시킬 수 있다¹⁾⁶⁾.

저압기기용 전선으로 주로 사용되는 비닐 캡타이어 타원형 코드(VCTFK)는 반복적 피로가 집중되면 도체 및 절연물이 손상되어 절연파괴, 단락, 접촉 불량 등이 발생할 수 있다. VCTFK는 일반적으로 옥내에서 교류 300[V] 이하의 소형 전기기구에서 사용되며 가요성 및 절연성이 좋다. 그러나 기계적

[†]To whom correspondence should be addressed.
enetek@naver.com

요인에 의해 중단선되었을 때 단위면적당 허용전류의 크기가 감소되어 실질적으로 손상 받은 부위에는 상대적으로 과전류 형태의 전류가 공급되어 사고를 유발시킨다⁷⁻¹³⁾.

따라서 본 연구에서는 저압용 전기기기의 전원선으로 주로 사용되는 VCTFK에 반복적 구부림을 인가하여 전선의 열화에 따른 화재발생 메커니즘을 모델링 조건에 따라 설정하고 그 결과를 분석하여 전기제해 발생경과를 밝히고 예방대책을 제시하고자 한다.

2. 실험

실험에 적용된 전선은 일반적으로 저압기기의 전원선으로 사용되는 비닐 캡타이어 타원형 코드(VCTFK)이다. 전선의 굵기는 0.75[mm²] (0.18mm/30), 1.25[mm²] (0.18mm/50), 2.0[mm²] (0.26mm/37)이다. 인가된 전압은 단상 220[V]이며, 주파수는 60[Hz]이다. 일정한 조건에서 반복피로 형태를 구현하기 위

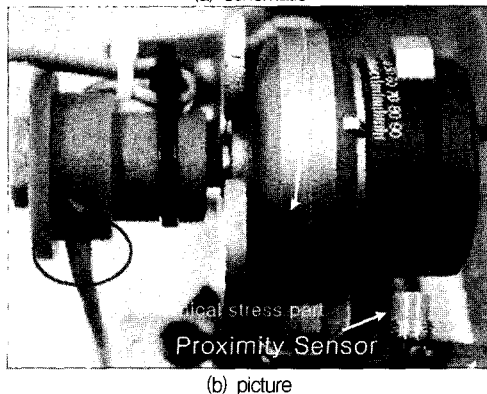
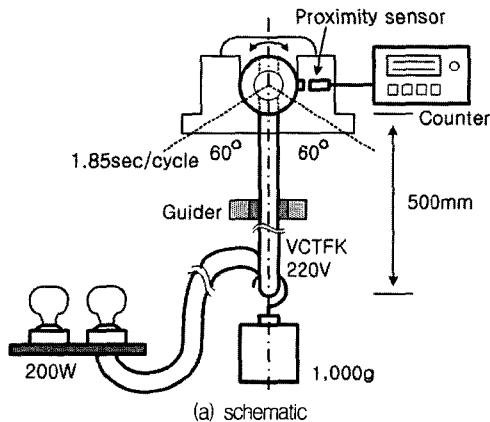


Fig. 1. The schematic of experimental setup

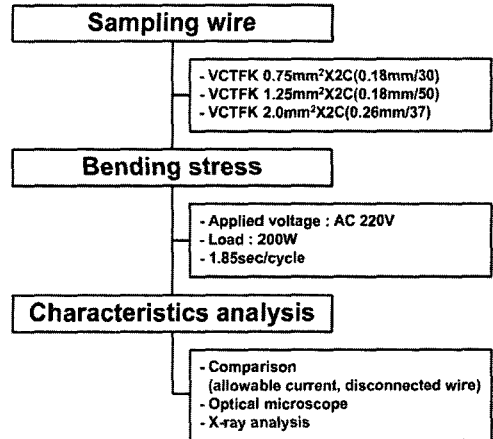


Fig. 2. Experimental process of wire by repeated stress

해 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였으며, 전선 끝부분에 전등부하 200[W]를 연결하고 가이드를 고정시킨 상태에서 단선될 때까지 반복 피로를 좌우 60°로 인가하였다. 1회 왕복하는데 걸린 시간은 1.85[sec]이며, 물리력을 가하는 무게는 1,000[g]이고 스트레스 인가 위치와의 거리는 500[mm]이다.

소손된 전선은 실체현미경(stereo microscope, SV-11, Carlzeiss, Denmark)을 이용하여 패턴을 분석하였으며, 금속 조직은 금속현미경(metallurgical microscope, Nikon, Japan)을 이용하였다. 그리고 전선의 내부는 X-선 분석기(x-ray analyzer, PcBa | analyzer, Pheonix, Germany)를 이용하여 내부 소손의 용단 패턴을 해석하였다. 전선의 소손 과정에서 발생하는 화염의 확산은 고속 이미지 시스템(HSIS; high speed image system, HG-100K, REDLAKE, USA)을 이용하였고, 탄화된 전선의 화학적 특성은 적외선분광기(FT-IR, Spectrum-GX, Perkin Elmer Ins., UK)를 이용하여 정성적으로 해석하였다. Fig. 2는 본 연구에서 수행된 실험의 과정을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. X-선 투과분석

Fig. 3은 반복 열화에 이용된 저압기기용 일체형 코드로 비닐 캡타이어 타원형 코드(VCTFK, 1.25[mm²])의 실제 사진이다. 사진에서도 알 수 있듯이 전선은 플러그, 플러그와 연장선, 연장선 등 3개 부분으로 구성되어 있다. 즉 실험에서는 연장선 부분 ①과 플러그와 연장선 ②을 대상으로 실시하였다.

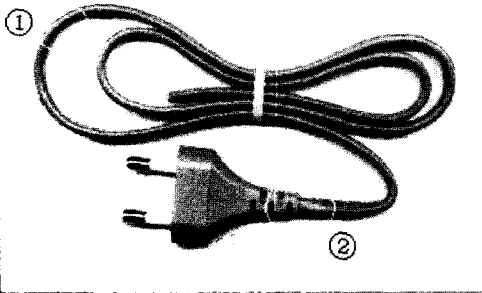


Fig. 3. The photograph of VCTFK

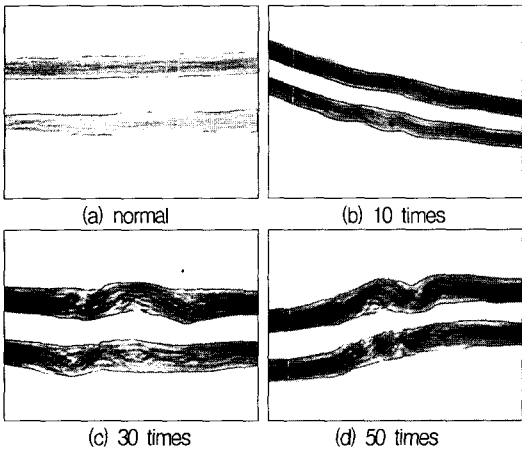


Fig. 4. X-ray patterns of ① of figure 3

Fig. 4는 Fig. 3의 ①부분을 Fig. 1과 같은 조건에서 구부림을 인가하였을 때 나타나는 소선의 변화를 X선 분석기로 나타낸 것이다. (a)는 정상상태의 전선으로 소선들이 비교적 균일하게 배열되어 있음을 알 수 있다. (b)는 10회 반복 구부림을 받은 것으로 구부린 부분에 약간의 굴곡이 발생했음을 알 수 있다. (c)는 30회 구부림을 인가한 것으로 소선의 변형이 국부적으로 발생하기 시작했다. (d)는 50회 반복 구부림을 인가한 것으로 소선의 일부가 단선되기 시작함을 볼 수 있고, 대부분의 전선이 뒤틀어진 형태를 나타낸다. 그리고 일부의 소선이 단선되기 시작하면 소선의 단선율이 급속하게 커짐을 알 수 있었다. 즉 이러한 상태에 이르면 전선의 저항이 급속히 증가되어 구부림은 중첩되고 가중되게 되어 아크 발생으로 인한 절연물의 탄화가 촉진된다.

Fig. 5는 Fig. 3의 ②부분을 Fig. 1과 같은 조건에서 구부림을 인가하였을 때 나타나는 소선의 변화를 X선 투과기로 나타낸 것이다. (a)는 700회 정도의 구부림을 인가한 전선으로 한쪽의 소선 전체가

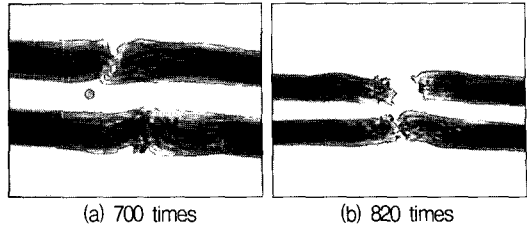


Fig. 5. X-ray patterns of ② of figure 3

단선됐음을 알 수 있고, 다른 한쪽 소선의 대부분도 단선되었거나 일정한 방향으로 심하게 변형되었음을 나타내고 있다. 이와 같은 상태에서 전원이 인가되면 소선끼리의 접촉저항이 증가되어 아크가 발생하고 절연물을 탄화시키게 된다. (b)는 820회 정도의 구부림을 인가한 X선 사진으로 두선이 완벽하게 단선되었고, 공간(gap)이 확보됨을 알 수 있다. 그리고 용융된 소선의 끝단에는 망울 모양이 형성된 것으로 보아 내부에서 지속적인 방전이 발생했음을 예측할 수 있다.

3.2. 탄화 패턴 및 착화 이미지 분석

Fig. 6은 전선의 소선 패턴 분석을 위해 광학현미경으로 나타낸 표면 및 단면 사진이다. (a)는 정상 전선의 외형을 촬영한 것이고, (b)는 구부림 피로에 의해 탄화된 전선의 외형을 촬영한 것으로 절연피복의 내부를 탄화시키고 외부로 열이 방출된 형태를 보여준다. 열 패턴은 소선이 들어 있는 내부에서 외부로 발산된 형태를 확인할 수 있었다. (c)는 탄화

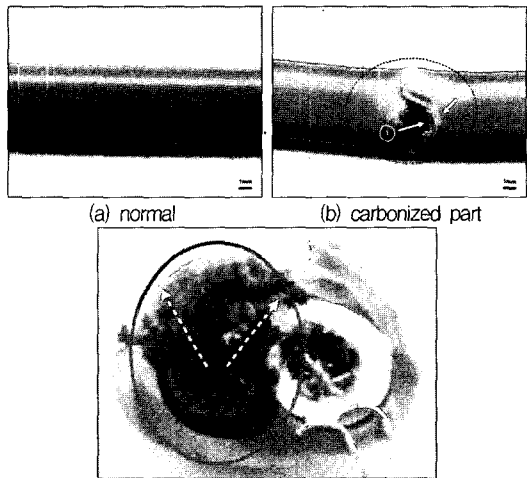


Fig. 6. Damaged patterns of a stranded wire by stereo microscope

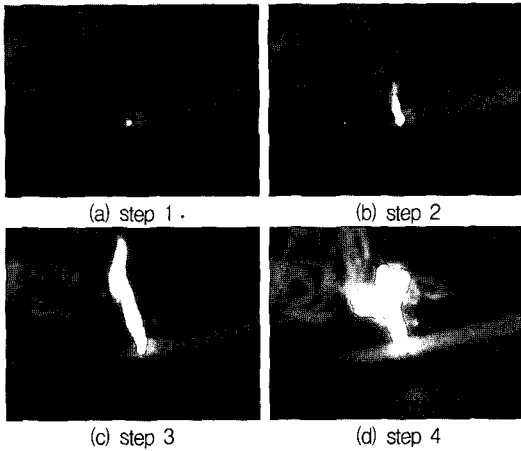


Fig. 7. The steps of fire progress

된 부분의 단면을 촬영한 것으로 절연피복의 탄화된 형태를 보면 화살표 방향으로 아크열이 진행된 것을 확인할 수 있으며 이는 비산된 소선의 용융 망울이 간헐적인 전원의 공급과 차단이 반복되면서 축열되어 절연피복의 가장 취약한 부분에서 외부로 비산되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 전선의 소선이 단선되어 끊어짐과 이어짐을 반복하면서 출화로 이어지는 과정을 나타낸 것이다. 출화의 과정은 고속 이미지 시스템(HSIS ; high speed image system)을 이용하여 실시간으로 데이터를 취득하였다. 초기에는 미소불꽃이 간헐적으로 진행되다가 탄화물 생성량이 많아지고 충분한 축열이 형성되면 화염은 일순간에 커졌으며, 주위에 가연성 물질이 있는 경우 일반화재로 확산되는 것이 증명되었다.

3.3. 용단된 소선의 조직 분석

Fig. 8은 소선된 VCTFK의 표면 및 단면을 실제 현미경과 금속 현미경을 이용하여 나타낸 사진이다. (a)는 전선의 표면을 나타낸 것이며 색도 일부 변색되었으며, 작은 구멍이 형성되었음을 알 수 있다. (b)는 (a) 부분의 피복을 제거하고 나타낸 것으로 소선의 전체가 단선되었고 탄화물이 발생하였다. (c)는 단선된 소선의 실제 현미경 사진으로 끊어짐과 이어짐의 반복에 의해 발생하는 아크에 의해 소선의 끝부분에 용융 망울이 형성됨을 볼 수 있으며 소선에는 피복 탄화물이 부착되어 있었다. (d)는 (c)의 단면조직으로 아크에 의해 형성되는 주상조직, 보이드 등이 관측되었다. 즉 전기적인 요인에 의해 용단되었음을 알 수 있다.

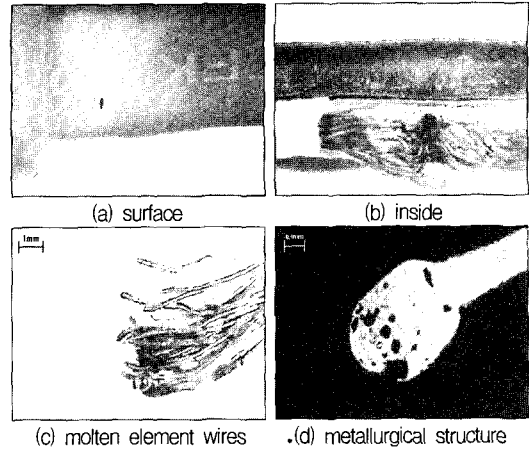


Fig. 8. The photographs of VCTFK

3.4. 화학적 표면구조

Fig. 9는 적외선 분광기(FT-IR)를 이용하여 Fig. 6의 (b)를 분석한 것이다. ①은 절연피복의 정상부분(normal)이며, ②는 탄화된 부분(carbonized part)을 분석한 것이다. 정상부분 ①의 $2900.0[\text{cm}^{-1}]$ 에서 탄소와 수소의 단일결합 형태인 알킬기가 확인되었고, $1720.1[\text{cm}^{-1}]$ 에서 탄소와 산소의 이중결합 형태인 카르보닐기가 확인되었다. 또한, $1579.4[\text{cm}^{-1}]$ 에서 작은 흡광피크가 확인되었다. 탄화된 부분 ②의 $3365.7[\text{cm}^{-1}]$ 에서 산소와 수소의 단일결합을 가진 흡광피크가 확인되었다. 이 흡광피크는 정상부분과 달리 열에 의해 탄화된 절연재료가 공기 중의 산소나 수분과 결합한 것으로 판단된다. 또한, $1716.9[\text{cm}^{-1}]$ 에서 흡광피크가 줄어들고 $1636.1[\text{cm}^{-1}]$ 의 흡광피크가 성장하는 것을 확인할 수 있는데 이는 산소와 탄소의 이중결합 고리가 열에 의해 분해되었다가 다시 공기 중의 산소와 재결합하는 것으로 판단된다.

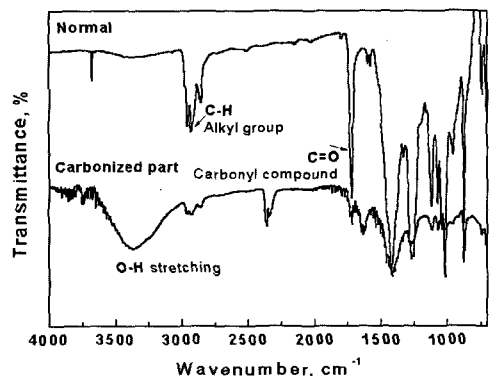


Fig. 9. IR absorption peaks comparison between normal and carbonized part of insulating materials

3.5. 단선율과 허용전류

Fig. 10은 반복피로에 의해 단선되기까지 구부림을 인가한 결과 소선의 수와 허용전류 사이의 상관관계를 나타낸 것이다. 0.75[mm²] (0.18mm/30)의 경우에는 486.3±54회의 범위에서 단선되었고, 1.25[mm²] (0.18mm/50)의 경우에는 826.3±7회에서 단선되었다. 2.0[mm²] (0.26mm/37)의 경우에는 760.7±36회에서 단선되는 특징을 보였다. 0.75[mm²] 전선을 기준으로 했을 때 1.25[mm²]가 약 1.7배의 기계적 강도를 나타냈으며, 1.25[mm²] 전선을 기준으로 했을 때, 2.0[mm²] 전선은 약 0.9배 정도로 기계적 강도가 낮게 나타났다. 따라서 구부림 스트레스에 의한 사고를 예방하기 위해서는 3종류의 전선 중 1.25[mm²]전선의 사용이 권장된다.

Fig. 11은 Fig. 10에 나타난 경향곡선과 전선의 허용전류를 비교한 것이다. 실험에 적용된 전선의 허용전류는 0.75[mm²]; 7[A], 1.25[mm²]; 12[A], 2.0[mm²]; 17[A]이다. 따라서 각각의 전선에 대해 허용전류와 단선율의 관계를 비교하면 2.0[mm²]의 전선이 가장 큰 허용전류를 가진 반면, 이동성이 우수한 것은 1.25[mm²]의 전선으로 나타났다. 즉 이동용 전기기

기의 전원선은 소선의 굵기가 가는 것을 사용하는 것이 반복 스트레스에 안정하다는 것을 의미하며, 1.25[mm²]의 전선이 전기적인 특성을 고려한 경제성이 가장 우수하다는 것을 의미한다.

5. 결론

반복적인 구부림 피로를 VCTFK 전선에 인가하였을 때 소손된 패턴 및 특성을 X-선 투과기, 실체 현미경, 금속현미경, 적외선분광기, HSIS 등으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반복적인 구부림 스트레스에 따라 소선은 점진적으로 변형되다가 어떤 한계점에 도달하면 일순간에 심한 변형 및 단선이 이루어지는 것을 X-선 투과 분석에서 알 수 있었다. 1.25[mm²] 전선의 경우 약 700회 정도의 구부림을 인가했을 때 한쪽의 소선 전체가 단선됐음을 알 수 있었고, 다른 한쪽 소선의 대부분도 단선되었거나 일정한 방향으로 심하게 변형되었을 나타내고 있다.

2) 전선이 탄화된 부분의 단면을 실체 현미경으로 탄화 패턴을 분석한 결과 내부에서 외부로 탄화가 진행되었고 비산되는 특성을 보였다. 그리고 HSIS에 의한 화염 확산과정을 보면 미소불꽃이 간헐적으로 발생하다가 탄화물 생성량이 많아지고 충분한 축열이 형성되면 화염은 일순간에 커짐을 알 수 있었다.

3) 단선된 소선의 실체 현미경 분석에서 용융 망울과 피복 탄화물이 확인되었다. 또한, 금속현미경으로 조직 분석한 결과 아크에 의해 형성되는 주상조직, 보이드 등이 관측되었다.

4) 정상부분의 2900.0[cm⁻¹]에서 탄소와 수소의 단일결합 형태인 알킬기가 확인되었고, 1720.1[cm⁻¹]에서 탄소와 산소의 이중결합 형태인 카르보닐기가 확인되었다. 또한, 1579.4[cm⁻¹]에서 작은 흡광피크가 확인되었다. 탄화된 부분의 3365.7[cm⁻¹]에서 산소와 수소의 단일결합을 가진 흡광피크가 확인되었으며, 1716.9[cm⁻¹]에서 흡광피크가 줄어들고 1636.1[cm⁻¹]의 흡광피크가 성장하는 것을 확인할 수 있는데 이는 산소와 탄소의 이중결합 고리가 열에 의해 분해되었다가 다시 공기 중의 산소와 재결합한 것으로 판단된다.

5) 전선의 허용전류와 단선율의 관계를 비교하면 2.0[mm²]의 전선이 가장 큰 허용전류를 가진 반면,

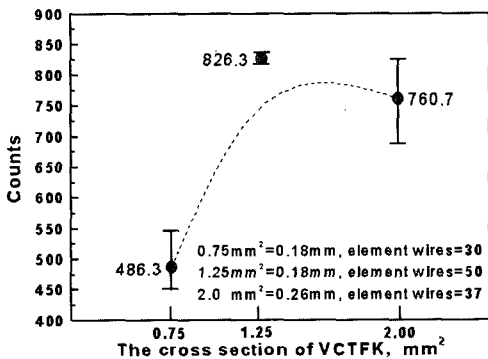


Fig. 10. The disconnection counts of VCTFK

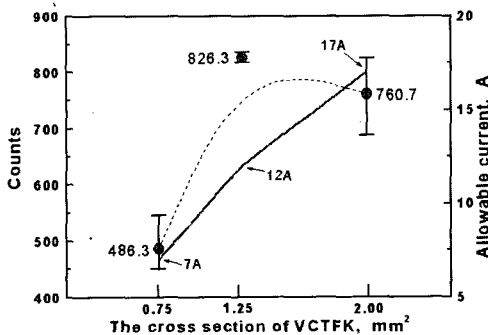


Fig. 11. Disconnection counts vs. allowable current

이동성이 우수한 전선은 1.25[mm²]의 전선으로 나타났다. 즉 이동용 전기기기의 전원선은 소선의 굵기가 가는 것을 사용하는 것이 구부림 스트레스에 안정하다는 것을 의미하며, 1.25[mm²]의 전선이 전기적인 특성을 고려한 경제성이 가장 우수하다는 것을 의미한다.

감사의 글 : 본 연구는 산업자원부 전력산업기반자금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 김영대, “전기재해통계분석”, 한국전기안전공사, pp. 7~63, 2003.
- 2) 최충석 외 5, “전기화재공학”, 동화기술, pp. 195~265, 2004.
- 3) 한국산업규격, KS C 3304, 산업자원부 기술표준원, 2000.
- 4) Norimich Watanabe 외 2, “電源コードの半斷線箇所における放電形態と發火危險性”, 日本火災學會研究發表會, pp. 202~203, 1994
- 5) 長田正義, “素線切れビニルコードの着火電流と流入エネルギー”, 日本火災學會, Vol. 33 No. 1, pp. 1~7, 1983.
- 6) Babrauskas, V., “Fires due to Electric Arcing: Can ‘Cause’ Beads Be Distinguished from ‘Victim’ Beads by Physical or Chemical Testing?”, *Fire and Materials*. pp. 189~201, 2003.
- 7) C. S. Choi et al, “The Scattering Patterns Analysis of Particles by Varying Short-Circuit Angles between Electric Wires”, *Fire Science and Tech., Proceeding of the sixth Asia-Oceania Symp.*, pp. 717~722, 2004.
- 8) 최충석 외 2, “열열화된 600V 2중 비닐절연전선의 특성변화 분석”, *대한전기학회논문지*, Vol. 49C, No. 1, pp. 8~12, 2000.
- 9) C. S. Choi et al, “A Study on the Growing Properties of the Cu₂O with Variation of Load Current”, *Journal of the KIIS*, Vol. 16, No. 5, pp. 46~49, 2001.
- 10) Maitland Jones, Jr., “Organic Chemistry”, Norton & Company, pp. 528~541, 2000.
- 11) P. Opaprakasit et al, “Intramolecular hydrogen Bonding and Calixarene-like Structures in P-Cresol / Formaldehyde Resins”, *J. of Molecular Structure*, pp. 25~35, 2001.
- 12) Sheera Knecht, “Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire”, *IEEE ISC on TP*, pp. 329~332, 1996.
- 13) Atila Metrol Member, “Estimation of Aluminum and Gold Bond Wire Fusing Current and Fusing Time”, *IEEE Trans. on CP & MT*, Vol. 18, No. 1, pp. 210~214, 1995.