

과부하에 의한 HIV 전선의 특성 변화에 관한 연구

호서대학교 소방방재학과, *호서대학교 화재조사연구실, **호원대학교 소방행정학부

이춘하, 옥경재*, 강동현*, 박형주**

1. 서론

경제발전과 더불어 우리사회는 첨단기술의 발달로 전기와 전자분야를 이용하는 첨단제품들이 개발되어 보급되고 정보통신 분야 등에 커다란 변화를 가져오게 되었고, 그 덕분에 우리의 생활 수준은 더욱 편리하고 윤택해지고 있다. 그 중 전기는 우리생활에 있어서 없어서는 안 될 중요한 부분이고 앞으로도 많은 부분을 차지할 것이다. 그러나 전기로 인한 화재의 발생률은 매년 증가하는 추세이고 항상 화재의 원인 중 주요 원인으로 꼽히고 있으며 그로 인한 인명과 재산의 손실을 초래하고 있다.

화재가 발생하게 되면 화재 원인을 규명하기 위해 현장의 흩어져 있는 수많은 증거물을 수거하여 과학적으로 분석할 수 있는 분야별 전문가와 첨단 분석장비 및 장비운영에 필요한 전문 인력과 많은 시간이 요구된다. 그러나 우리나라는 화재원인을 과학적으로 분석할 수 있는 분야별 전문가와 첨단장비가 절대 부족한 현재의 상

황 하에서 화재현장에서 다양한 증거물을 짧은 시간에 많은 양을 정확하게 수거한 후 분석해야 하므로 증거물을 모양과 형태에 따라 분류하면서 적의의 수량을 단시간에 채취해야 하는 당면 과제를 안고 있다. 1)~7)

특히, 전기화재에 있어서 규명방법은 추정에 의하거나 화재현장에서 수집한 전기기기나 전선 용흔을 육안관찰에 의해 전기화재를 판정하는 등 감식기준이 모호하여 원인을 규명하는데 미흡한 점이 많았으며 이로 인한 전기화재 점유율은 전기사용량 증가율보다 높은 증가율을 보이고 있다.

따라서 본 연구에서는 전기화재의 주요원인 중의 하나인 과전류에 의한 전선의 표면 및 조직의 소손상태를 분석하기 위해 옥내 배선재료로 널리 사용되고 있는 HIV(600[V] 2중 비닐절연 전선) 전선(도체경 : 2.0mm)에 허용전류의 200~500% 범위내에서 과전류를 인가하였으며, 이로부터 얻은 특성변화들을 화재조사의 감식 및 감정시 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험 방법

2.1 실험장치

HIV 전선에 과전류를 인가하기 위하여 대전류 시험기(DY-302, Dae-yang electric)를 사용하였다. 대전류 시험기의 회로 구성은 Fig. 1과 같다.

HIV 전선의 인가전류별 온도변화를 측정하기

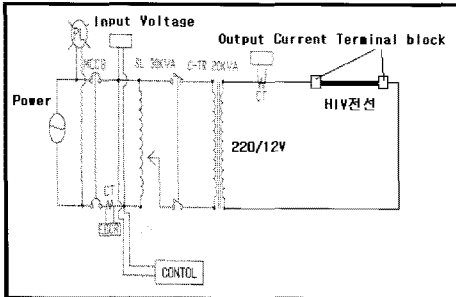


Fig. 1. 대전류 시험기의 회로구성도

위해 Fig. 2의 적외선 카메라와 전선의 표면 손상상태를 분석하기 위해 Fig. 3의 실체 현미경 SZ-11, Olympus, Japan)를 사용하였다. 또한, 인가전류별 HIV 전선의 조직변화를 분석하기 위해 Fig. 4의 금속현미경 (GX-51, Olympus)를 사용하였다.

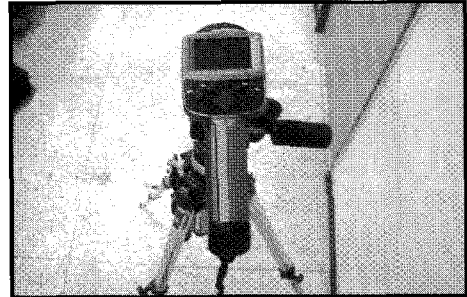


Fig. 2. 적외선 카메라(CAM E2)

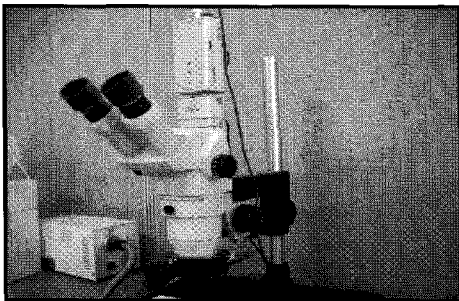


Fig. 3. Stereoscopic Microscope(SZ-11)

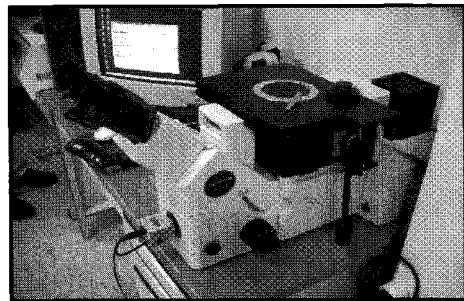


Fig. 4. GX-51 Microscope

2.2 실험방법

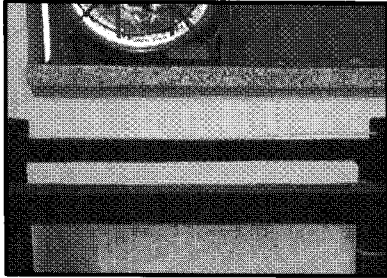
실험방법은 Fig. 1과 같이 회로를 구성하고 대전류 공급 장치로 HIV 전선(2.0mm)에 정격허용 전류(35[A])의 200[%]에서부터 500[%]의 과전류를 지속적으로 인가하여 HIV 전선이 용단될 때까지 실험을 진행하였다. 인가전류의 상태는 전선의 온도 상승으로 인한 전류의 감소량을 지속적으로 보정하여 초기 인가전류를 실험이 끝날

때까지 유지하였다. HIV 전선의 온도변화는 5초 간격으로 측정을 하였으며, 실험은 인가전류별 최소 10회 이상 실시하여 각각의 시료에 대하여 비교분석을 하였다.

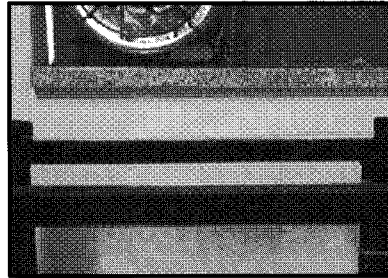
3. 실험결과 및 고찰

3.1. HIV전선의 과전류에 의한 단락 실험

3.1.1. 허용전류의 200[%] 전류 인가시
가. 실험장면



(a) 실험 시작 전



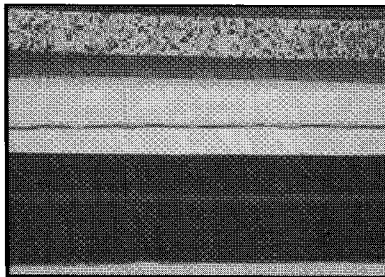
(b) 5시간 경과

Fig. 5. 허용전류의 200[%] 전류 인가시

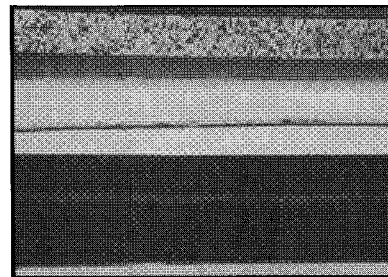
나. 실험결과

허용전류의 200[%]를 인가시 HIV 전선은 외형적으로 특별한 변화가 없었으며, 온도를 측정 한 결과 최고 162[°C]까지 온도가 상승하였다.

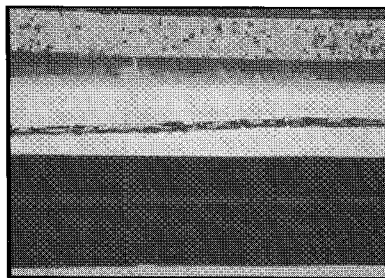
3.1.2. 허용전류의 250[%] 전류 인가시
가. 실험장면



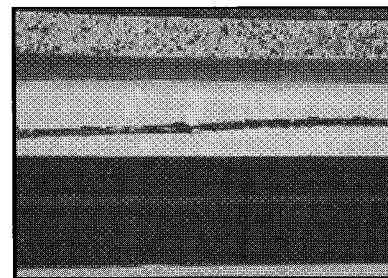
(a) 2분 15초 경과



(b) 3분 10초 경과



(c) 6분 44초 경과



(d) 5시간 경과

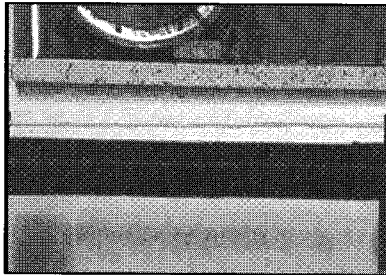
Fig. 6. 허용전류의 250[%] 전류 인가시

나. 실험결과

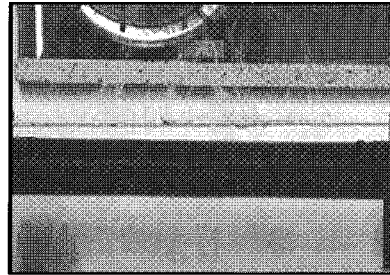
허용전류의 250[%]를 인가시 약 2분 15초 경과 후 HIV 전선 피복의 색이 변화되었고, 약 3분 10초경 연기가 발생되면서 피복이 탄화되기 시작하였다. 그러나 약 6분 44초 후 더 이상의 변

화가 나타나지 않았다. 그리고 전선의 피복이 완전히 탄화되지 않고 부분적으로 탄화됨을 확인할 수 있었다. HIV전선의 온도는 최고 441[°C]까지 상승 하였으며, 용단 현상은 나타나지 않았다.

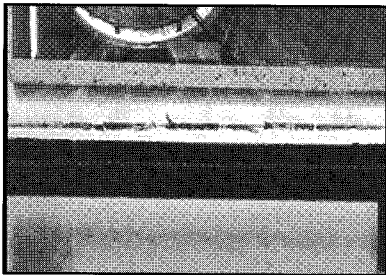
3.1.3. 허용전류의 300[%] 전류 인가시 가. 실험장면



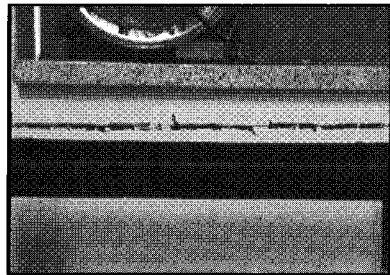
(a) 1분 13초 경과



(b) 1분 30초 경과



(c) 2분 32초 경과



(d) 6분 20초 경과

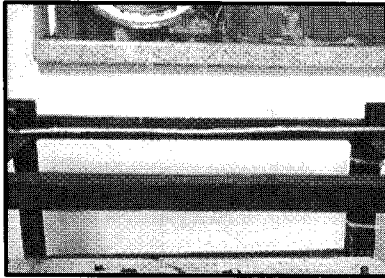
Fig. 7. 허용전류의 300[%] 전류 인가시

나. 실험결과

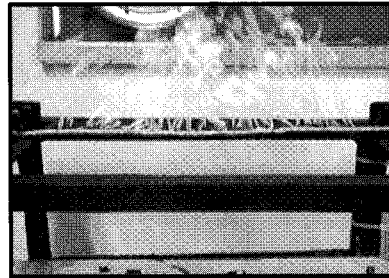
허용전류의 300[%]를 인가시 약 1분 13초 후 피복의 색이 변화되었고, 약 1분 30초경에 연기가 발생되면서 피복이 탄화되기 시작하였다. 약

6분 20초 후 더 이상 변화가 나타나지 않았으며, 최고온도는 691[°C]까지 상승 하였고, 약 4분 33초 후 온도는 630[°C]로 일정 하였으며, 용단현상은 발생하지 않았다.

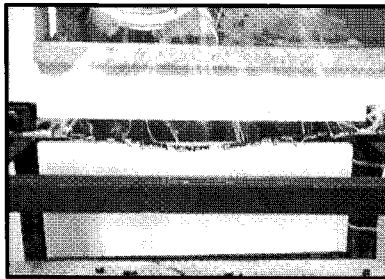
3.1.4. 허용전류의 350[%] 전류 인가시
가. 실험장면



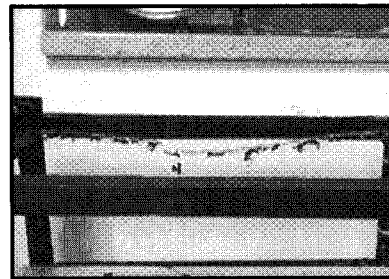
(a) 45초 경과



(b) 1분 5초 경과



(c) 1분 38초 경과



(d) 2시간 6분 경과

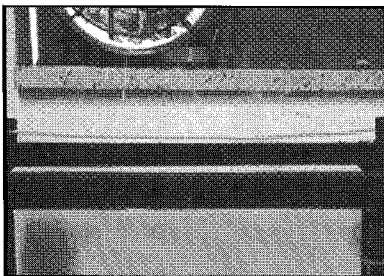
Fig. 8. 허용전류의 350[%] 전류 인가시

나. 실험결과

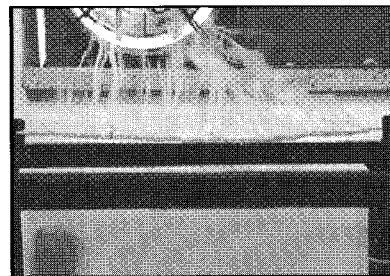
허용전류의 350[%]를 인가시 약 45초 후에 피복의 색이 변화되었고, 약 1분 5초경에 연기가 발생되면서 피복이 탄화되기 시작하였다. 약 1분 38초 후에는 피복이 급격히 탄화되기 시작 하면

서, 4분 25초경과 후에는 피복이 완전히 탄화 되었다. HIV 전선의 최고온도는 700[°C]까지 상승 하였으며 3분 20초 이후 약 650[°C]를 유지하다가 평균 2시간 16분 58초경 전선의 중앙부에서 용단 되었다.

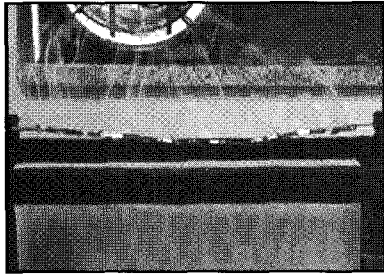
3.1.5. 허용전류의 375[%] 전류 인가시
가. 실험장면



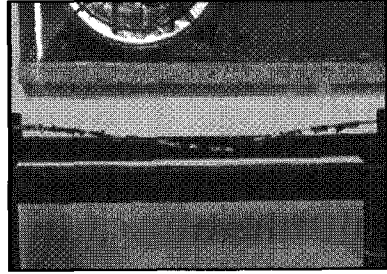
(a) 37초 경과



(b) 56초 경과



(c) 1분 28초 경과



(d) 1분 48초 경과

Fig. 9. 허용전류의 375[%] 전류 인가시

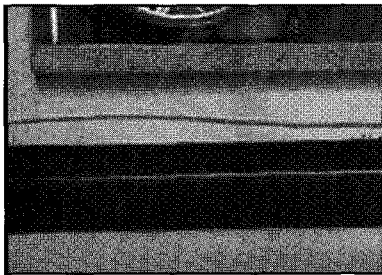
나. 실험결과

허용전류의 375[%]를 인가시 약 37초 후에 피복의 색이 변화되었고, 약 56초경에 급격히 많은 연기가 발생되면서 피복이 탄화되기 시작하였다.

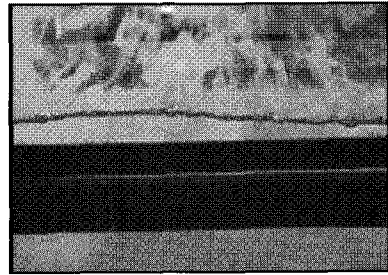
약 1분 28 후에는 피복이 대부분 탄화되면서 약 1분 48초경에 용단 되었다. 용단 시 온도는 965 [°C]로 측정되었다.

3.1.6. 허용전류의 400[%] 전류 인가시

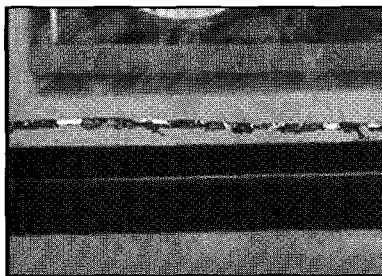
가. 실험장면



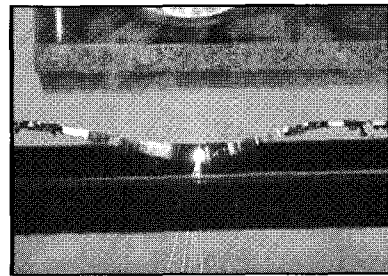
(a) 32초 경과



(b) 47초 경과



(c) 1분 12초 경과



(d) 1분 18초 경과

Fig. 10. 허용전류의 400[%] 전류 인가시

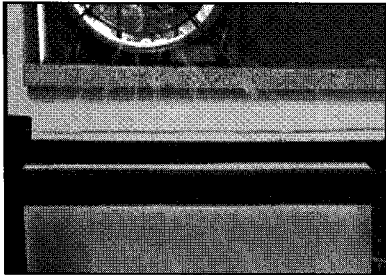
나. 실험결과

허용전류의 400[%]를 인가 시 약 32초 후에 피복의 색이 변화되었고, 약 47초경에 급격히 많은 연기가 발생되면서 피복이 탄화되기 시작하

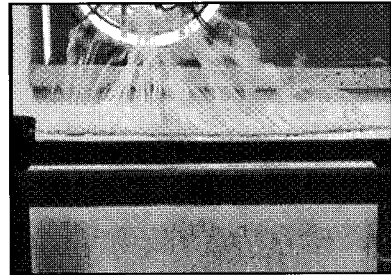
였다. 약 1분 12초 후에는 피복이 대부분 탄화되면서 약 1분 18초경에 불꽃을 내면서 용단 되었다. 용단시 온도는 약 1088[°C]로 측정되었다.

3.1.7. 허용전류의 425[%] 전류 인가시

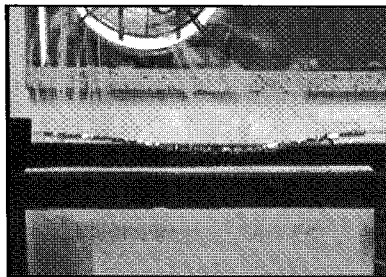
가. 실험장면



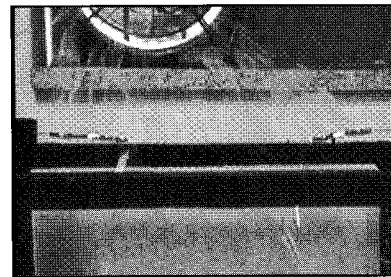
(a) 31초 경과



(b) 43초 경과



(c) 1분 1초 경과



(d) 1분 5초 경과

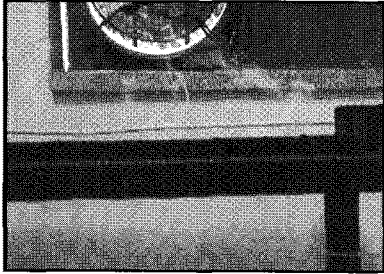
Fig. 11. 허용전류의 425[%] 전류 인가시

나. 실험결과

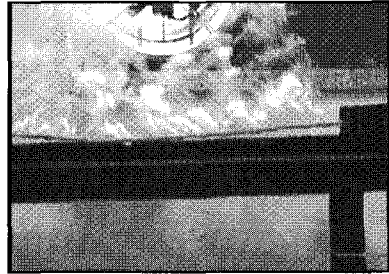
허용전류의 425[%]를 인가시 약 31초 후에 피복의 색이 변화되었고, 약 43초경에 급격히 많은 연기가 발생되면서 피복이 탄화되기 시작하였다. 약 1분 1초 후에는 피복이 대부분 탄화되면서 약 1분 5초경에 조각이 나면서 용단 되었다. 용단시 온도는 940[°C]로 측정되었다.

3.1.8 허용전류의 450[%] 전류 인가시

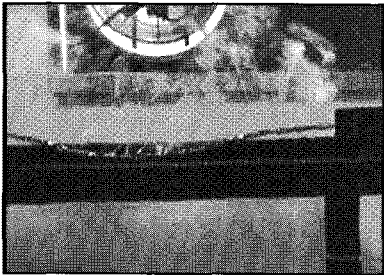
가. 실험장면



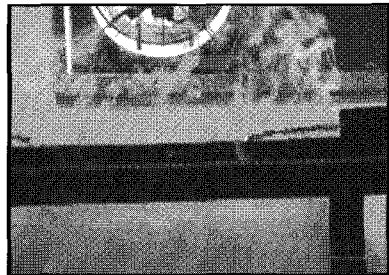
(a) 26초 경과



(b) 36초 경과



(c) 49초 경과



(d) 55초 경과

Fig. 12. 허용전류의 450[%] 전류 인가시

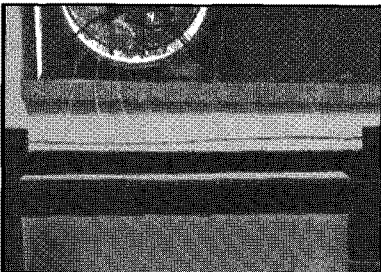
나. 실험결과

허용전류의 450[%]를 인가시 약 26초 후에 피복의 색이 변화되었고, 약 36초경에 급격히 많은 연기가 발생되면서 피복이 탄화되기 시작하였다.

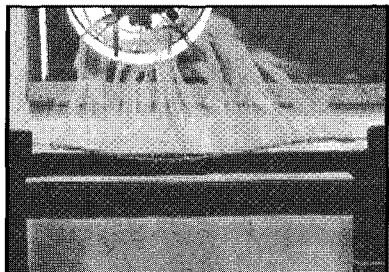
약 49초 이후에는 피복이 대부분 탄화되면서, 약 55초경에 HIV 전선의 여러부분에서 용단 되었다. 용단시 온도는 1021[°C]로 측정되었다.

3.1.9 허용전류의 475[%] 전류 인가시

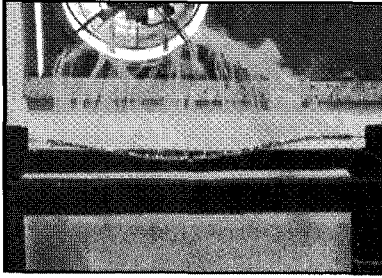
가. 실험장면



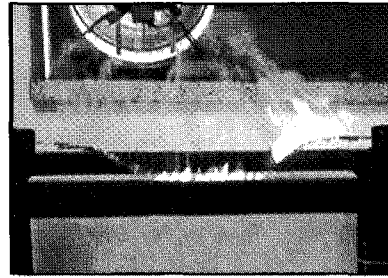
(a) 26초 경과



(b) 42초 경과



(c) 47초 경과



(d) 52초 경과

Fig. 13. 허용전류의 475[%] 전류 인가시

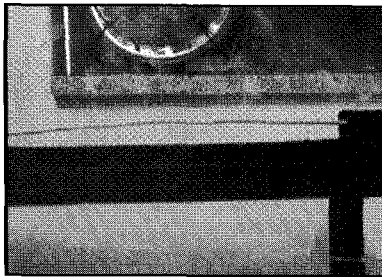
나. 실험결과

허용전류의 475[%]를 인가시 약 26초 후에 피복의 색이 변화되었고, 약 42초경에 급격히 연기가 발생하면서 피복이 탄화되기 시작하였다. 약

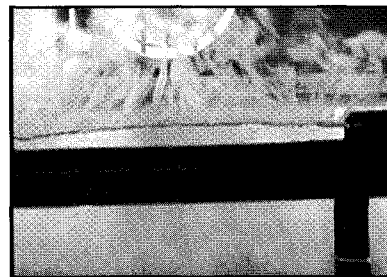
47초 이후에는 피복이 탄화되면서 화염이 발생되었고, 약 52초경에 용단이 되었다. 용단시 온도는 896[°C] 까지 측정이 되었다.

3.1.10. 허용전류의 500[%] 전류 인가시

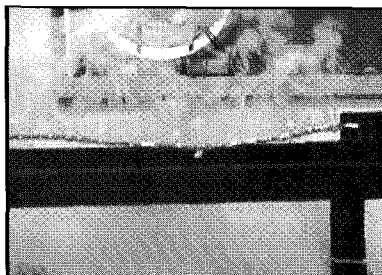
가. 실험장면



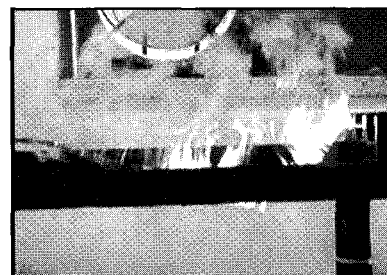
(a) 20초 경과



(b) 30초 경과



(c) 36초 경과



(d) 42초 경과

Fig. 14. 허용전류의 500[%] 전류 인가시

나. 실험결과

허용전류의 500[%]를 인가시 약 20초 후에 피복의 색이 변화되었고, 약 30초경에 급격히 연기가 발생하면서 피복이 탄화되기 시작하였다. 약 36초 이후에는 피복이 탄화되면서 발생한 가연성 증기에 불꽃으로 인한 화염이 발생되었고, 약 42초경에 용단이 되었다. 용단 시 온도는 922 [°C] 까지 측정이 되었다.

Fig. 15는 인가 전류별 HIV 전선의 온도변화를 나타낸 것이고, Fig. 16은 인가 전류별 HIV 전선의 용단 시간을 나타낸 것으로 허용전류의 350[%] 이하에서는 HIV 전선의 용단현상이 발생하지 않았으나, 허용전류의 350[%] 이상의 전류에서는 HIV 전선이 용단되는데 걸리는 시간이 급격하게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

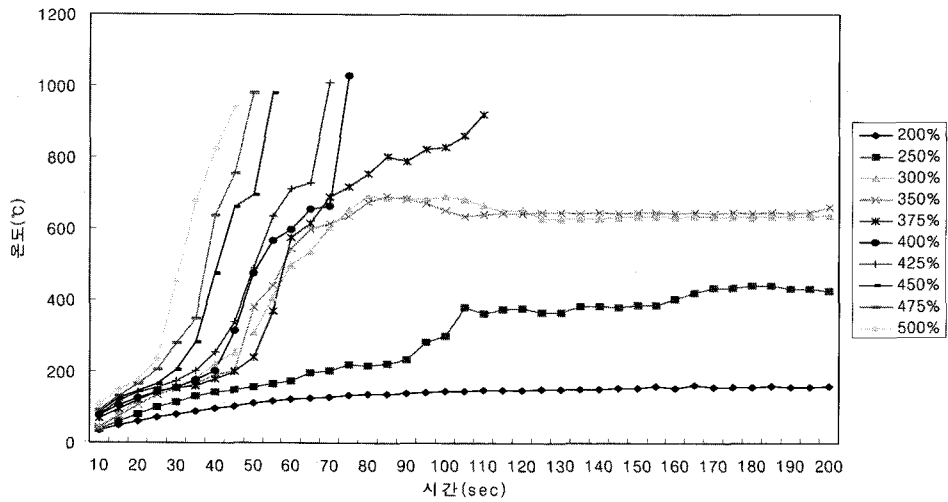


Fig. 15. HIV전선의 인가 전류 별 온도 상승 곡선

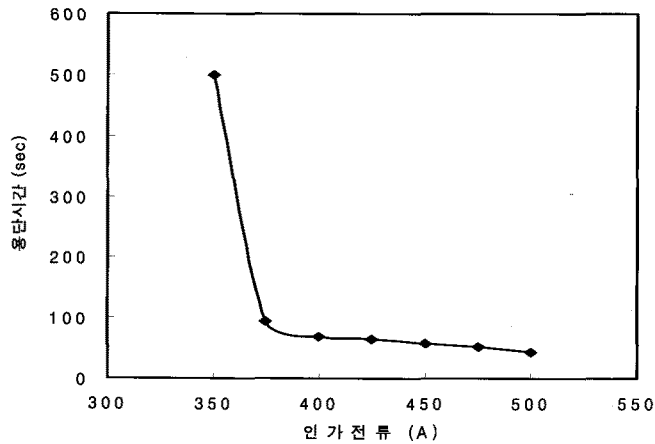


Fig. 16. HIV 전선의 인가 전류별 용단 시간

3.2. 단락된 HIV전선 표면분석

3.2.1. 인가 전류별 HIV 전선의 표면

Fig. 17은 인가 전류별 HIV 전선의 표면을 실체 현미경을 이용하여 촬영한 것으로 허용전류의 200[%]~300[%]까지는 HIV 전선의 외형적인 변화는 나타나지 않았으며, 과전류에 의해 발생

된 열에 의해 도체 표면이 변색된 것을 확인 할 수 있었다. 허용전류 350[%]부터는 열에 의한 HIV 전선의 표면 조직의 변형이 나타나기 시작 하였으며, 허용전류 375[%] 이상에서부터는 화산이 터진 것처럼 HIV 전선 도체의 조직이 변형된 것을 관찰 할 수 있었다.











시료	용단된 도체의 표면	시료	용단된 도체의 표면
200 [%]		250 [%]	
300 [%]		350 [%]	
375 [%]		400 [%]	
425 [%]		450 [%]	
475 [%]		500 [%]	

Fig. 17. 인가 전류 별 HIV 전선의 표면

3.2.2. 인가전류별 HIV 전선의 용단된 부분

Fig. 18은 인가전류별 HIV 전선의 용단된 부분을 실체 현미경으로 촬영한 것이다. 허용전류의 350[%]가 인가된 HIV 전선의 용단부는 대체로 끝부분이 길게 늘어나면서 끊어진 것 같은 형상이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 허용전류의

375[%]와 400[%]가 인가된 HIV 전선의 용단부는 대부분 망울의 형태를 확인할 수 있었다. 허용전류 425[%] 이상으로 인가된 HIV 전선의 용단부는 용단시 발생하는 스파크로 인해 용융이 되었다기보다는 고체가 부서진 듯한 형상이 나타나는 것을 볼 수 있었다.





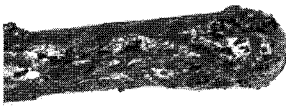


시료	용단된 부분	시료	용단된 부분
350 [%]		450 [%]	
375 [%]		475 [%]	
400 [%]		500 [%]	
425 [%]			

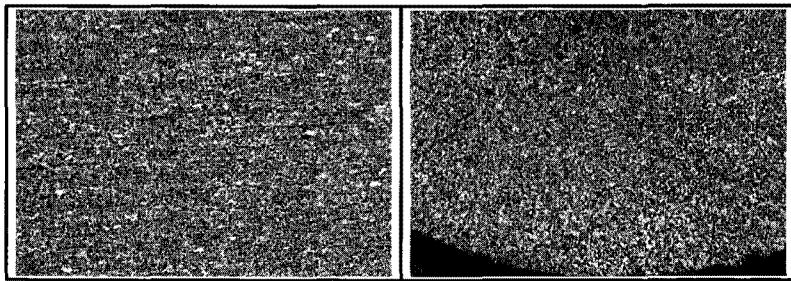
Fig. 18. 인가 전류 별 전선의 용단형태

3.3. 전선 도체의 조직 분석 결과

3.3.1. 정상적인 HIV 전선의 조직

Fig. 19는 정상시료의 단면과 측면 도체조직을 금속 현미경(GX-51 Microscope)으로 촬영한 것으

로, 정상시료의 단면 및 측면 내부 조직을 관찰한 결과 일정한 방향성이 없는 결정 조직을 관찰할 수 있었다.



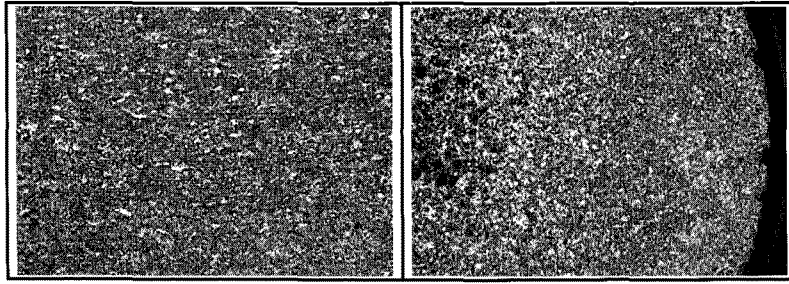
(a) 측면(Side section) 배율 : 100

(b) 단면(Cross section) 배율 : 100

Fig. 19. 정상적인 HIV 전선의 조직

3.3.2 허용전류의 200[%]를 인가한 도체조직

허용전류의 200[%]를 인가한 HIV 전선의 조직 상태는 정상시료의 조직과 크게 다르지 않음을 확인 할 수 있었다.



(a) 측면(Side section) 배율 : 100

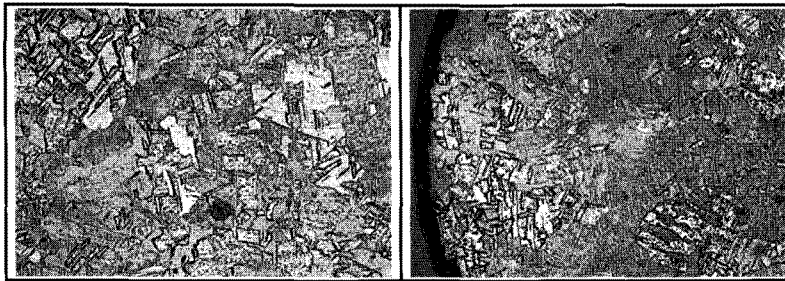
(b) 단면(Cross section) 배율 : 100

Fig. 20. 허용전류의 200[%]를 인가한 HIV 전선의 조직

3.3.3 허용전류의 300[%]를 인가한 도체조직

허용전류의 300[%]를 인가한 도체조직을 관찰한 결과 정상시료에 비하여 결정입자의 크기가 뚜렷하게 커진 것을 관찰할 수 있었으며, 전체적

으로 조직생성 및 입자의 경계가 명확해지며 결정 입자들이 병합되어 정상시료보다 조직이 크게 성장한 것을 확인할 수 있었다.



(a) 측면(Side section) 배율 : 100

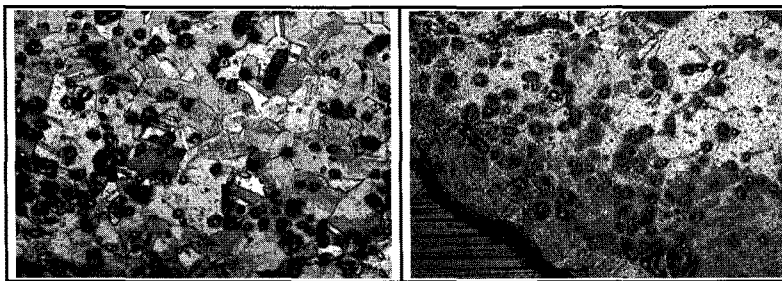
(b) 단면(Cross section) 배율 : 100

Fig. 21. 허용전류의 300[%]를 인가한 HIV 전선의 조직

3.3.4 허용전류의 400[%]를 인가한 도체조직

허용전류의 400[%]를 인가한 HIV 전선의 조직에서는 결정입자의 경계가 뚜렷하게 나타났고

조직의 크기가 더욱 커진 것을 관찰할 수 있었으며. 검은색의 기공이 불균일하게 경계면 사이에 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다.



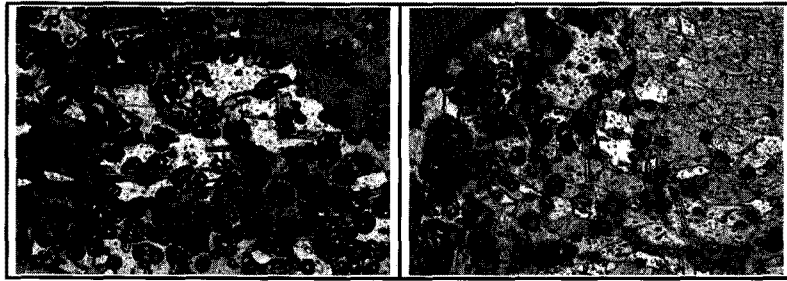
(a) 측면(Side section) 배율 : 100

(b) 단면(Cross section) 배율 : 100

Fig. 22. 허용전류의 400[%]를 인가시 HIV 전선의 조직

3.3.5. 허용전류의 500[%]를 인가한 도체조직
 허용전류의 500[%]를 인가한 HIV 전선의 조직은 기공이 더욱 뚜렷하고 많이 나타남을 볼 수 있었다. 이는 조직의 병합과 함께 결정 사이에 공기가 불균일하게 침투하여 사이사이마다

기공이 형성되는 것으로 사료 된다. 기공은 주로 HIV 전선 외부의 용융된 표면 가까이에 주로 분포 되어 있었고, 내부에는 기공의 생성으로 인해 입계(粒界)와 산화물(酸化物)이 전체적으로 확산되어 있는 것을 알 수 있었다.



(a) 측면(Side section) 배율 : 100

(b) 단면(Cross section) 배율 : 100

Fig. 22. 허용전류의 500[%]를 인가한 HIV 전선의 조직

5. 결론

HIV 전선(2.0mm)에 과전류를 인가하여 전선이 용단 될 때까지의 시간에 따른 온도 변화와 전선의 외형 및 도체의 조직 변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 인가 전류의 변화에 따른 HIV 전선의 온도 상승은 과부하율이 증가할수록 급격히 증가함을 알 수 있었으며, 200~350[%]의 경우 온도가 상승하다가 일정온도에 수렴함을 알 수 있었다. 이는 전선 피복이 탄화되어 도체가 대기로 노출되기 시작하면 전류에 의해 도체에서 발생하는 열과 도체에서 대기로 방출되는 열이 같아지면서 일정온도를 유지하는 것으로 판단된다.
- 2) 과부하에 의한 용단 현상은 허용전류의 350[%]를 기준으로 발생함을 알 수 있었다. 또한, 전선의 용단 되는 형상이 허용전류의 350[%]~400[%]에서는 전선 중심부분의 한

곳에서 끊어졌으나, 허용전류 425[%]~500[%]에서는 화염이 발생하면서 여러 부분에서 동시 다발적으로 비산되며 용단 되는 형태가 나타남을 확인할 수 있었다.

- 3) 용단 부분의 형태를 분석한 결과 허용전류 400[%]까지는 전선의 용단된 부분에 용융 방울의 흔적과 대체로 원형의 형태들을 발견할 수 있었으며, 허용전류 425[%] 이상에서는 급격한 온도 상승으로 인해서 전선의 용단 된 상태가 나무가 부러진 모습처럼 쪼개짐 현상이 나타남을 확인할 수 있었다.
- 4) 도체 표면을 분석한 결과 허용전류 350[%]에서부터 표면의 용융 및 색변화가 나타나기 시작하였으며, 인가전류가 증가 할수록 용융 및 피사 현상이 매우 심하게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 과부하로 인해 짧은 시간 동안에 온도상승의 급격한 증가로 인해 도체조직의 변형이 나타난 것으로 판단된다.

5) 도체의 조직의 변화를 관찰한 결과 허용전류 200[%]에서는 정상시료의 조직과 크게 다른 변화를 보이지 않았으나, 허용전류 300[%] 이후부터는 조직의 크기가 점점 커지며 도체 내 기공이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 인가하는 전류의 양이 높을수록 조직의 크기는 더욱 증가하며, 기공의 크기 역시 증가함을 알 수 있었다.

pp.189~209, 2004

- [14] 한국전기안전공사, 전기화재 원인분석 및 예방대책 연구, 1994
- [15] 한국전기안전공사, 화재현장에서 전선 용혼의 육안 식별법, pp.5-14, 2001
- [16] 박오철, 전선의 도체조직 분석에 의한 전기화재 감식, 2004
- [17] 최충석, 열적스트레스를 받은 나전선(Cu)의 특성변화 해석, 한국화재보험협회 “방재와 보험 - 9·10월호”, pp. 34~41, 2005

참고문헌

- [1] 이춘하 외 3명, 소방학개론, 신평문화사, pp.61~71, 2003
- [2] 설동환, 과전류 인가시험에 의한 전기화재 분석, 1997
- [3] 한국전기안전공사, 전기화재 감정기법 연구, pp.29~41, pp.74~75, 1998
- [4] 양성용, 전선의 단면적 변화에 따른 열분포 해석, pp.3~7, 2001
- [5] 한국전기안전공사, 배선기구 탄화 및 발열에 의한 전기화재 위험성 연구, pp. 15~22 , pp.28~39, 1996
- [6] 한국전기안전공사, 배선용 및 기기용 전선의 화재위험성에 관한 연구, pp9~24, pp.204~206, 2001
- [7] 오홍석, 전기화재의 발생원인 및 분석에 관한 연구, 한국화재·소방학회 논문지 제 16 권 제4호, pp. 72~76, 2002
- [8] 행정자치부, 화재통계연보, pp.3-104, 2005
- [9] 한국전기안전공사, 전기재해통계분석, 2004
- [10] 한국산업규격 C, 전기 Part
- [11] 내선규정 제1장 제125절 전선, 제 130절 허용전류
- [12] 김점호, HIV 전선의 화재원인 분석에 관한 연구, pp.18~24, 2004
- [13] 이춘하 외 5명, 전기화재공학, 동화기술,