

[Research Paper]

오염물질에 따른 HFIX 절연전선 피복의 특성 변화에 관한 연구

최수길 · 남영재 · 진세영 · 김시국^{*†}

호서대학교 소방방재학과 대학원생, *호서대학교 소방방재학과 교수

Characteristics of HFIX Insulated Wire Sheaths Contaminated by Pollutants

Su-Gil Choi · Yeong-Jae Nam · Se-Young Jin · Si-Kuk Kim^{*†}

Graduate Student, Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo Univ.,

*Professor, Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo Univ.

(Received April 4, 2020; Revised May 10, 2020; Accepted May 11, 2020)

요 약

본 논문은 오염물질에 따른 HFIX 절연전선 피복의 특성변화에 관한 연구이다. HFIX 절연전선 피복을 오염시키기 위해 전선의 내수성시험 항목인 KS C IEC 60811-1-3 규격을 인용, 오염물질을 선정하고 선정된 오염물질에 시료를 노출시켜 주차 별 최대 4주간 노출된 실험시료를 제작하였다. 그 후 주차 별 시료들을 대상으로 최대인장하중 및 신장률을 측정하였다. 오염노출 기간이 길어짐에 따라 최대인장하중이 상온시료의 경우 6.22%, 고온시료 6.52%, 방청윤활제 19.94% 감소하였고, 신장률 또한 급격하게 감소하여 피복 특성저하가 뚜렷하게 나타났다. 추가적인 주사전자현미경을 이용한 표면 분석결과 오염기간이 길어짐에 따라 천공, 갈라짐, 용융 등의 구조 변경 현상이 발생되어 기계적 특성이 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 절연전선의 성능저하를 방지하기 위해 검사주기 및 보수시기의 마련이 필요할 것으로 생각된다.

ABSTRACT

In this study, the characteristics of HFIX insulated wire sheaths contaminated by pollutants were examined. KS C IEC 60811-1-3 standard was followed in performing the water-resistance wire tests. Pollutants were selected, and the specimens were exposed to the pollutants for a maximum duration of four weeks. The maximum tensile load and the elongation rate were measured each week. As the period of pollution exposure increased, the maximum tensile load of the specimens decreased by 6.22% and 6.52% at room temperature and high temperature, respectively, and 19.94% for specimens coated with a rust-proof lubricant. The elongation rate also decreased rapidly, such that the reductions in the properties of the sheath were significant. From the analysis of the surfaces using a scanning microscope, as the contamination period increased, structural changes such as perforation, split, and melting occurred, and the mechanical properties of the specimens decreased. Therefore, it is necessary to develop and follow an inspection cycle and periodically carry out repairs to prevent the deterioration of insulated wires.

Keywords : HFIX insulated wire, Pollutant, Characteristic change, Electrical fire

1. 서 론

국가화재정보센터 화재통계자료에⁽¹⁾ 의하면 2019년 국내 발생한 전체 화재건수는 40,101건이며, 이중 전기적 요인에 의한 화재건수는 9,465건(23.60%)으로 부주의를 제외한 전체 화재요인 중에서 가장 높은 수치로 나타났다. 전기적 요

인에 의한 발화요인별 발화기기 발생건수를 보면 배선/배선기구 2,204(31.1%)건, 전기설비 1,166(16.55%)건, 계절용기기 890(12.6%)건 순으로 주 발화기기는 배선/배선기구에 가장 많이 발생 되고 있다. 또한, 전기설비의 경우도 상당수 높은 발화 비중을 차지하고 있어 배선, 전기설비에 대한 안전성 향상과 각별한 주의가 필요하다. 이중, 배선의

[†] Corresponding Author, E-Mail: kimsikuk@hoseo.edu. TEL: +82-41-540-5736, FAX: +82-41-540-5738

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

경우 전기적 안전성을 확보하기 위해 일반적으로 절연전선을 사용하고 있으며, 현재 국내 건축물 및 옥내배선용에 가장 많이 사용되는 전선은 HFIX (450/750 V 저독성 난연 가교 폴리에틸렌 절연전선) 절연전선이다.

HFIX 절연전선의 경우 폴리에틸렌을 사용하여 친환경적이며 강도와, 내열성이 확보된 전선으로 HIV 및 IV 절연전선보다 화재 시 발생 되는 연기와 독성 가스를 억제하는 특성을 가지고 있다. 하지만 HFIX 절연전선의 경우 절연체에 수분 및 오염물질에 노출되면 절연능력이 저하되어 누전 및 단락 사고가 발생된다는 문제점이 제기되고 있고, 실제 황민수⁽²⁾의 연구에 의하면 HFIX 절연전선의 시공상 문제가 발생되었다는 설문 연구가 진행되었으며, 50% 이상 문제가 되었다고 제기되어 현재까지도 문제점이 지속적으로 발생되고 있다. 위와 같은 HFIX의 절연체에 성능저하가 발생된다면 누전 및 단락으로 인해 화재로 이어질 수 있고, 이에 따라 화재 및 배선기구에 대한 화재건수도 상당수 이러한 문제점이 포함되어 나타나는 것으로 보인다. 이에 따라 HFIX 절연전선의 문제점 원인을 분석하여 지속적인 연구가 필요하지만 HFIX 절연전선의 경우 국제표준 규격(IEC)이 아닌 국내 KS 표준 및 전기설비기술기준을 적용하고 있어, 국외적으로 해당 절연전선이 제조되지 않고 연구가 진행되지 않았으며, 국내 또한 HFIX 절연전선의 문제점 제시의 설문조사만 진행되어 오염물질에 따른 피복 특성 및 기계적 성능 저하에 관한 정량적으로 평가한 연구는 미비한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 HFIX 절연전선 오염물질 노출에 따른 피복특성을 분석하기 위해 시공 시 접촉되는 오염물질과 결로현상에 의한 수분이 노출된 경우를 적용하여 오염물질을 선정하였고, 일정기간 동안 오염물질 노출 시간을 부여하여 기간별 실험시료를 제작하였다. 피 실험체를 대상으로 국제표준 규격 시험기준인 KS C IEC 60811-1-1 (전기케이블의 절연체 및 시스 재료의 공통시험방법-제1부: 시험방법 총칙-제1절: 두께 및 완성품 외경 측정-기계적인 특성 시험) 및 KS C IEC 60227-2 (정격전압 450/750 V 이하 염화비닐절연 케이블 : 시험방법)^(3,4)에 의거 최대인장하중 및 신장률 측정을 진행하여 오염물질 노출기간에 따른 절연피복의 물리적 성능변화를 분석하고, 추가적으로 오염물질에 따른 절연피복의 구조변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용한 표면분석과 적외선 분광분석(FT-IR)을 통하여 시료의 성분 특성을 분석하고자 한다.

2. HFIX 절연전선 피복특성

HFIX 절연전선은 옥내배선공사에서 주로 사용되며, KS 표준의 IEC 부합화에 따라 그동안 사용되어 오던 HIV 절연전선의(KS C 3328, 450/750 V 내열 비닐 절연전선)전선 표준이 화재 시 발생하는 HCl 및 유독가스 배출, 다량 연기발생 등 여러 가지 문제가 제기되어 폐지되면서 대체 전선으로 주로 사용되고 있다. 절연전선의 경우 KS C IEC 60227-3

(정격전압 450/750 V 이하 염화비닐절연 케이블-제3부:배선용 절연전선)⁽⁵⁾규격에 의한 일반용 단심 비닐 절연전선(기호:60227 KSIEC 01, IV)과 기기 배선용 단심 비닐 절연전선(기호:60227 KSIEC 07, HIV)이 있으며, 이러한 절연전선은 KS C 3328과 동일 PVC(염화비닐) 절연체를 사용하고 있고, PVC 절연체의 경우 열 또는 화재 시 HCl 분해 및 배출하는 특성이 있으며, 단일재료로 이루어져 제조되고 있다.

HFIX 절연전선의 경우 복합재료이며, 주요 재료가 올레핀계 고분자 재료인 Ethylene (2.5~40%), Propylene (75~95%), α -Olefin의 조성으로 이루어져 있으며, 가교폴리에틸렌 절연전선으로 대부분의 조성물이 Polyethylene 및 Polypropylene으로 되어있다. 거기에 추가되는 기타 α -Olefin의 성분들이 가교(Bridging, Cross-linking)결합의 형식으로 이루어져 있다. 가교란 사슬 모양의 구조를 가진 천연 및 합성 고분자를 결합시켜 새로운 화학 결합을 만들어, 고무 상 탄성을 발현시키기 위해 필요한 3차원 망상구조를 지니게 하는 방법이다. 이러한 가교 반응은 결합의 수가 많아질수록 사슬 모양 고분자의 가용성과 열가소성은 줄어들지만, 반면에 기계적 강도는 커진다. 또한, 가교 조건에 따라 고분자의 화합물의 탄성이 증가하게 된다. Polyethylene은 Ethylene의 중합체 모두를 가리켰으나, 현재는 플라스틱에 사용되는 고중합체만 나타낸다. 약칭은 PE이며, 전선에 쓰이는 PE는 대표적으로 Low density polyethylene (LDPE) 및 Liner low density polyethylene (LLDPE)가 사용된다. LDPE의 분자는 군데군데 분기되어 있으며 규칙적으로 배열되어 있지 않아 결정화되기 어려우며 부드러운 특징을 지니고 있다. PE의 일반적 성질로는 반투명의 유백색이고 물보다 가벼우며, 연소하면 Paraffin과 같은 상태로 된다. 내수성, 전기절연성, 내산성, 내알칼리성이 뛰어나고, 열 안정성도 좋으며 성형하기 쉬운 성질을 가지고 있으나, 연화점이 낮고 화학적으로 불활성이기 때문에 직접 인쇄하거나 접착시키기 어려운 성질이 있다.

Polypropylene은 Propylene ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$)의 중합체로서, 가장 가벼운 플라스틱이며, 연화점이 높고 가공성도 좋다. 약칭은 PP이며, Propylene 중합을 Radical initiator 중합이나 이온 중합으로 양이온 중합시키면 분자량이 작은 물질만이 얻어진다. 분자 구조적으로 매우 규칙적인 배열을 갖고 결정성도 좋으며 연화점이 170 °C인 중합체가 생성된다. 수분 투과력이 매우 낮은 특성을 가지며 화학약품에 잘 견디는 특성이 있지만 낮은 온도에서는 폴리에틸렌에 비해 쉽게 깨지는 단점을 지니고 있다. 기계적 성질은 폴리에틸렌보다 뛰어나지만, 산소의 존재 하에서 빛 또는 열에 의해 산화·열화하는 결점이 있어 안정제를 필요로 한다^(6,7).

HFIX 절연전선의 경우 난연 특성을 부여하기 위해 무기질 비 할로겐 난연제를 첨가하는데 이때, 난연제로 많이 사용되는 Aluminum hydroxide는 장시간 물과 접촉 시 겔(Gel)상이 된다⁽⁸⁾. 겔 상태에서는 흡착력이 높아지며, Acid와 Aluminum과 반응하여 용해되는 성질이 있지만, 절연저항을 떨어뜨리는 원인이 된다. 난연제의 다량 첨가는 HFIX 절연전선의 단

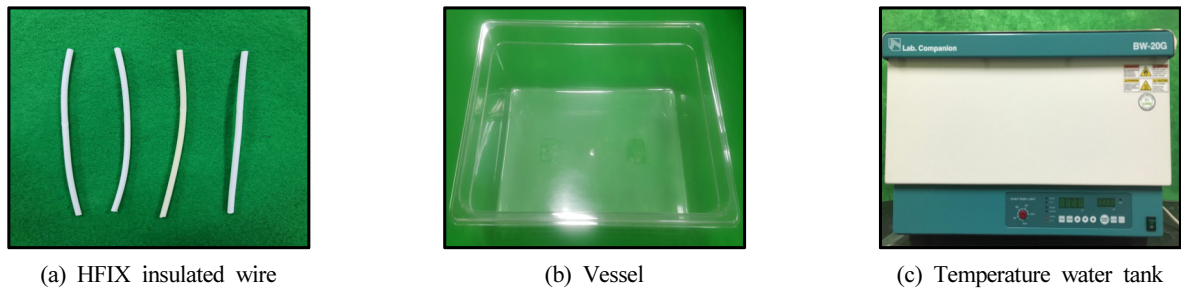


Figure 1. Photograph of accelerated degradation experiment.

점을 개선하는 반면 기계적 특성을 저하시킨다. 기계적 특성의 저하로 물과 장시간 접촉하여 겔상이 된 전선은 아파트 등의 옥내 전선관에 결로 현상에 의해 물고임 현상, 습도 증가로 인하여 절연재료 표면에 작은 물방울 또는 얇은 물막이 생성되고, 전선 피복에 수분이 침투하여 절연이 파괴된다. 이러한 절연체 파괴 현상은 결국, 누전 및 절연 열화에 의한 화재발생의 위험성을 높여주는 요인이 된다⁹⁾.

3. 실험

3.1 시험시료 및 오염물질 노출 실험

본 연구에 사용된 시험시료는 KS C 3341 규격의 2.5 SQ의 HFIX 절연전선을 사용하였으며, 이때 시험시료는 KS C IEC 60811-1-1에 의거한 최대인장하중 및 신장률 측정을 위해 전선의 길이를 150 mm (구리선 제거) 시험시료를 제조하였다. 오염물질의 선정은 HFIX 절연전선의 문제가 제기되는 수분과의 접촉을 가정하기 위해 상온상태의 물을 선정하였고, 또한 HFIX 절연전선 KS C 3341에 시험항목이 없는 KS C IEC 60811-1-3의 내수성시험¹⁰⁾을 참고하여 85 °C의 물을 선정하였다. 추가적으로 HFIX 절연전선의 시공상 발생하는 문제점인 HFIX 절연전선의 난연성을 높이기 위해 절연체에 돌가루¹¹⁾ 등 첨가제를 첨가함에 따라 절연체 표면이 거칠어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 실제 현장에서 쉽고 편리하게 작업하기 위해 방청윤활제(WD-40, Bex-inter corporation Co., Korea) 및 주방세제, 마가린, 식용유 등을 전선 표면에 발라 시공하는 현장 특이성을 적용하여 방청윤활제를 선정하였다. 이에 따라 총 상온의 물, 85 °C의 물, 방청윤활제 3가지의 선정된 오염물질을 준비된 시험시료에 일정기간 노출 시켰다. 노출 기간은 전기 케이블 및 광케이블의 절연체 및 시스 재료의 공통 시험방법 제 1-3부 내수성시험 기준(KS C IEC 60811-1-3)을 참고하여 1주, 2주, 3주, 4주간 노출 시켰으며 노출 후 시료는 세척 후 상온에 24 h 건조하여 실험에 사용하였다. Figure 1은 오염물질 노출 실험에 사용된 시험시료와 장비로 Figure 1의 a는 HFIX 절연전선으로 흰색의 절연전선을 사용하였으며, 왼쪽 정렬로부터 정상시료, 4주간 상온의 물에 오염 노출된 절연전선과(이하; 상온시료), 4주간 85 °C의 물에 오

염 노출된 절연전선(이하; 고온시료), 4주간 방청윤활제에 오염 노출된 시료이다. 육안 확인상 정상 및 상온시료는 변색 및 재질 촉감상의 변화는 식별되지 않았으며, 고온시료의 경우 열화에 의한 시료의 변색이 진행되었다. 방청윤활제 시료의 경우 변색은 발생되지 않았으나, 시료 표면상의 고무 재질의 연질촉감이 더욱 강해진 것을 확인할 수 있었다. Figure 1의 b는 상온의 물과 방청윤활제에 노출시키기 위한 용기로 절연전선을 물에 완전히 담그어 기준에 의거 일정기간 동안 노출 시켰으며, 방청윤활제 또한 절연체 전체 노출하였다. Figure 1의 c는 항온 수조로써 85 °C의 물에 절연전선을 노출시키기 위한 장비로 사용하였다.

3.2 HFIX 절연전선 피복의 최대인장하중 및 신장률 측정실험

최대인장하중 실험은 KS C IEC 60811-1-1 규격에 의거하여 상온 23 ± 5 °C에서 진행하였고, 완제품을 대상으로 실험을 진행 측정하였기 때문에 출하 검사 기준 250 ± 50 mm/min의 인장 속도인 200 mm/min으로 설정하였으며, 표점(Gauge length)간 거리는 20 mm로 하였다.

Figure 2의 인장강도 시험기(Z005TN, Zwick/Roell Co., USA)를 이용하여 강도시험을 진행해 최대인장하중과 신장률을 분석하였다. 최대인장하중과 신장률은 시편이 끊어지기 직전까지 받은 하중과 늘어난 길이(Stretched length)로 계산하였으며, 신장률(Elongation)은 식(5)을 이용하여 계산하였다. 모든 실험 데이터는 약 15회 실험을 실시하여 상한값 3회와 하한값 3회를 제외한 평균값을 적용하여 데이터를 분석하였다.

$$\text{elongation}(\%) = \frac{\text{stretched length} - \text{gauge length}}{\text{gauge length}} \times 100 \quad \text{식(5)}$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 HFIX 절연전선 피복의 최대인장하중 및 신장률 측정실험 결과

Figure 3은 오염물질에 따른 주차별 인장강도 그래프로 정상상태 시료의 최대인장하중은 13.34 kgf로 나타났으며,

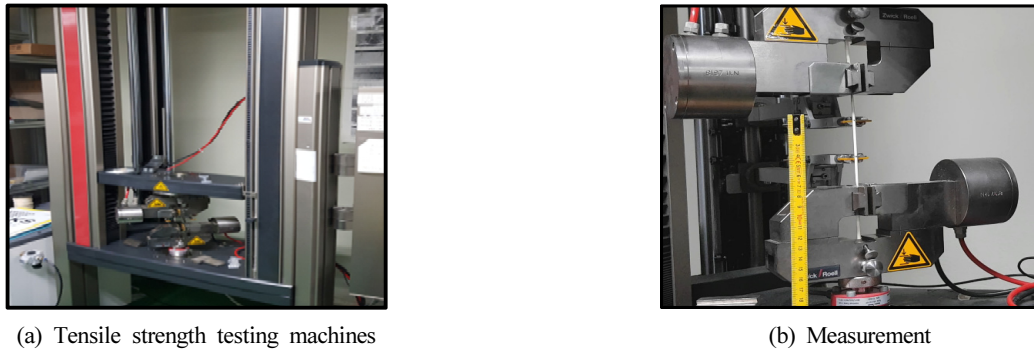


Figure 2. Photograph of tensile load and elongation measurement experiment.

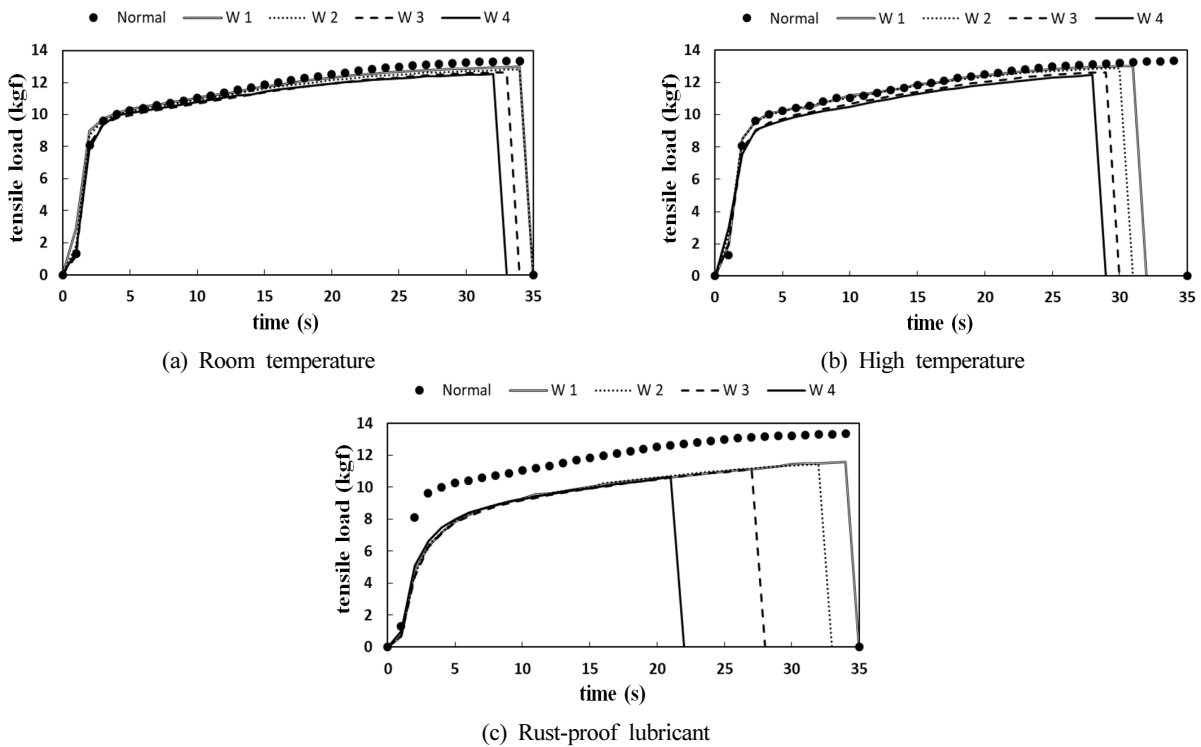


Figure 3. Results of tensile load.

상온시료의 최대인장하중은 1주차 12.98 kgf, 2주차 12.79 kgf, 3주차 12.64 kgf, 4주차 12.51 kgf로 오염 노출 시간이 진행될수록 최대인장하중이 감소되는 것으로 나타났다. 반면, 파단시간은 정상시료의 경우 35 s로 나타났으며, 1주차, 2주차 시료는 동일 시간인 35 s 나타났고, 3주차의 경우 34 s 4주차의 경우 33 s로 감소하는 것으로 나타났다. 고온시료의 최대인장하중은 1주차 13.02 kgf, 2주차 12.88 kgf, 3주차 12.65 kgf, 4주차 12.47 kgf로 오염 노출 시간이 진행될수록 최대인장하중이 감소하였으며, 파단시간은 1주차 32 s, 2주차 31 s, 3주차 30 s, 4주차 29 s로 더욱 감소되는 것으로 나타났다. 방청윤활제에 오염 노출된 시료의 최대인장하중은 1주차 11.61 kgf, 2주차 11.45 kgf, 3주차 11.12 kgf, 4주차 10.68 kgf로 오염 기간이 진행될수록 급격히 감소하였다.

파단시간은 1주차 35 s, 2주차 33 s, 3주차 28 s, 4주차 22 s 감소되는 것으로 나타났다. 실험을 통해 HFIX 절연전선 피복은 상온시료의 경우 최대인장하중은 정상시료 기준으로 1주차 2.7%, 2주차 4.12%, 3주차 5.25%, 4주차 6.22% 감소하였고, 파단시간의 경우 4주차 최대 5.7% 감소하였다. 고온시료의 경우 최대인장하중은 정상시료 기준으로 1주차 2.4%, 2주차 3.45%, 3주차 5.17%, 4주차 6.52%로 감소하였고, 파단시간의 경우 4주차 최대 17.14% 감소하였다. 방청윤활제에 오염 노출하였을 경우 최대 인장하중은 정상시료 기준으로 1주차 12.97%, 2주차 14.17%, 3주차 16.64%, 4주차 19.94% 감소하였고, 파단시간의 경우 4주차 최대 37.14% 감소하는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과 오염 노출시간이 길어질수록 최대인

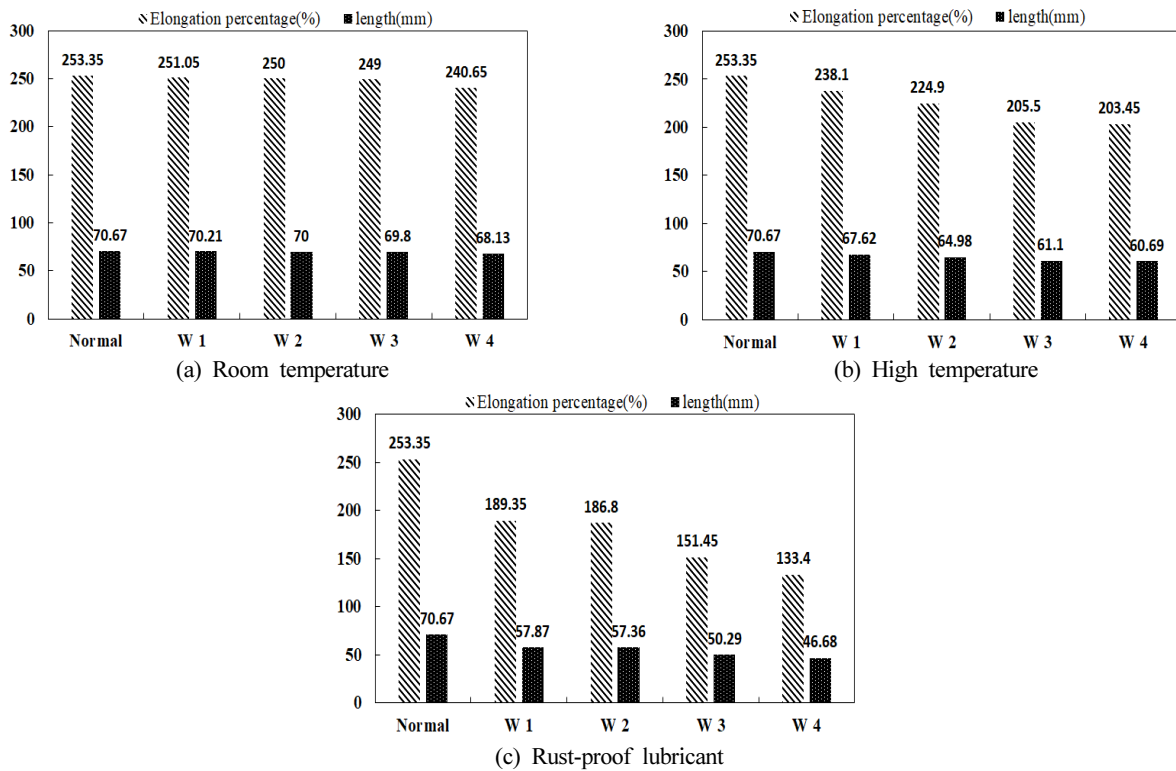


Figure 4. Results of elongation and stretched length.

장하중이 감소되고, 파단시간 또한 짧아지는 경향을 확인할 수 있었는데, 이는 인장강도 시험기에 의해 동일 인장속도인 200 mm/min으로 절연피복을 당기게 되지만 오염 노출시간이 길어짐에 따라 절연전선의 절연체에 수분 및 오염물질이 흡수되어 연신구조를 파괴하여 절연체 본연의 강도와 연신률이 저하된 것으로 판단되며 또한 탄성의 소실로 인해 파단시간이 크게 감소됨으로써 절연체의 기계적 성능 저하가 상대적으로 증대되는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 4는 오염물질별 노출시간에 따른 HFIX 절연전선 피복의 최대인장하중 측정실험 중 파단 직전의 표점(20 mm 기준)을 포함한 늘어난 길이(ΔL)와 신장률(식(5)대입) 측정 그래프로써 정상시료는 ΔL 70.67 mm (신장률 253.35%)로 측정되었고, 상온시료의 경우 1주차 ΔL 70.21 mm (신장률 251.05%), 2주차 ΔL 70 mm (신장률 250%), 3주차 ΔL 69.8 mm (신장률 249%), 4주차 ΔL 68.13 mm (신장률 240.65%)로 오염기간이 증가됨에 따라 늘어난 길이와 신장률이 미약 감소되는 것으로 나타났다.

고온시료의 경우 1주차 ΔL 67.62 mm (신장률 238.1%), 2주차 ΔL 64.98 mm (신장률 224.9%), 3주차 ΔL 61.1 mm (신장률 205.5%), 4주차 ΔL 60.69 mm (신장률 203.45%)로 상온시료보다 7.44 mm 더욱 감소하는 것으로 나타났다.

방청윤활제 시료의 경우 1주차 ΔL 57.87 mm (신장률 189.35%), 2주차 ΔL 57.36 mm (신장률 186.8%), 3주차 ΔL 50.29 mm (신장률 151.45%), 4주차 ΔL 46.68 mm (신장

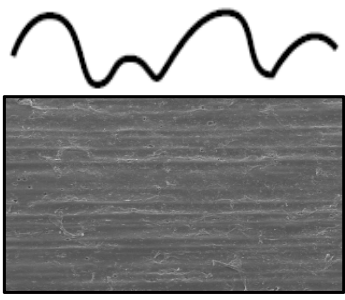
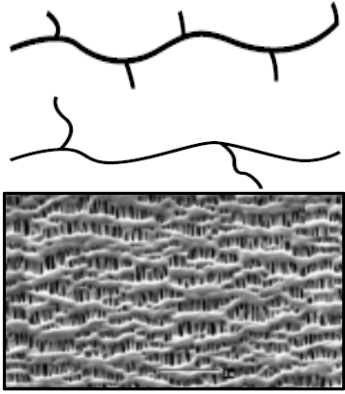

률 133.4%)로 급격하게 신장률이 감소하고, 전체적인 오염물질에 따른 신장률이 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

전반적인 실험결과 오염기간에 따른 HFIX 절연전선 피복의 기계적 성능 저하를 관찰할 수 있었는데, 이는 열경화성 수지인 폴리올레핀 분자구조 사이에 수분 및 오염물질이 침투되어 분자 사슬을 분리하여 결합하는 성질을 약화시키고, 흡수에 의한 분자 재결합에 따른 절연체의 본연의 성질이 저하된 것으로 판단된다. 또한, 실험결과와 마찬가지로 오염기간이 증가될수록 최대인장하중과 신장률이 감소하고, 파단시간과 강도의 기계적 성질이 감소되면서, 최종적으로 당김 및 굽힘 물리적 충격에 의해 피복이 쉽게 손상 또는 파손이 발생될 것으로 생각된다. HFIX 절연전선의 경우 대부분 옥내배선에 설치되는 전선으로 건축물 시공 후 별다른 제품 하자가 발생하지 않는 이상 지속적으로 사용하는 문제점이 있고 실제 약 4주간의 오염노출 실험을 진행하여 특성변화를 도출한 결과 피복 특성저하 및 절연체의 기계적 성능 저하가 발생하는 것을 확인하였다.

4.2 HFIX 절연전선 피복의 주사전자현미경 표면분석 결과

Table 1은 고분자의 따른 표면 구조를 나타낸 표로써 PVC 절연재료의 경우 표면구조는 선형 표면구조를 가지고 있으며 직선적인 패턴을 보이는 것이 특징이다. 해당 사진은 PVC 절연재료를 사용하는 HIV 절연전선의 표면 구조

Table 1. Photograph of Pattern by Structure of Polymer

Type	Pattern	Example
Linear pattern		PVC, PS
Branched short chain and long chain branched pattern		PE
Ladder pattern		Poly

이다. HFIX 절연재료에 사용되는 PE의 경우 짧은 가지 사슬형 또는 긴 가지 사슬형의 구조를 가지고 있다. 또한, Polymer 복합재의 경우 사슬이 합성되며 만들어지는 사다리형을 가지고 있다⁽¹²⁾.

Figure 5는 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 HFIX 절연전선 시료 표면을 500배, 2,000배, 5,000배 확대한 사진이다. 모든 시료는 4주간 오염된 시료를 기준으로 분석하였다. Figure 5의 a는 정상상태의 HFIX 절연전선 표면을 500, 2,000, 5,000배 확대한 사진으로 작은 굴곡과 결정들이 이어져 가지형 사슬 패턴 및 사다리형 패턴 형태가 보이고 있고 이러한 패턴들의 약한 고저가 보이며 PVC 절연재료의 보다 더욱 거친 표면을 가진 것을 확인할 수 있었다. 이는 복합재료로서 입자들이 망상구조 및 결합하여 뭉친 표면에 굵은 고저가 생기는 것으로 판단된다. Figure 5의 b는 상온시료의 표면을 확대한 사진으로 정상시료에 비하여 전체적으로 입자가 뭉친 모습에서 변화하여, 결정구조가 선명하게 발생되었고 겹겹이 층이 쌓인 것처럼 고저가 발생한 형태를 보이고 있다. 또한, 일부 약한 천공들이 발생된 것을 확인하였다. Figure 5의 c는 고온시료의 표면을 측정된 사진으로 정상시료와 상온시료에 비해 표면 굴곡이 적게 발생되었으며 전체적으로 절연표면 자체의 갈라지는 현상이 발생 되었고, 조밀한 균열

을 보이는 형태가 발생 되었다. Figure 5의 d는 방청윤활제에 오염노출 시킨 HFIX 절연전선 표면 사진으로 뭉친 입자들의 표면이 녹아 사방으로 분출되어 밀리고 퍼지는 방사형 패턴을 보이는 것을 확인하였다.

실험결과 정상상태 시료의 표면과 상온시료 표면의 차이점이 가장 많이 발생되지 않았지만, 작은 천공들이 곳곳 발생됨에 따라 4주간의 짧은 시간에도 오염 및 표면의 변화를 확인할 수 있었고, 또한 오염 노출이 지속된다면, 더욱 상태가 악화되어 전기화재의 가능성을 높일 것으로 판단된다. 고온시료의 경우 열에 의한 절연열화와 오염물질에 의한 절연열화를 동시 진행됨에 따라 시료 표면의 결정형 구조들이 다발적 및 조밀하게 형성되는 것을 확인할 수 있었고, HFIX 절연전선은 난연성을 높이기 위해 돌가루 및 Aluminum hydroxide 등과 같은 난연제를 첨가하는데 일정 비율을 초과 첨가하게 되면 절연전선이 경질화 되어 기계적 성능이 저하되는 단점이 발생되고, 절연전선은 건축물 내부에 사용되어 굴곡 및 전선관 등을 문제없이 통과하기 위해 유연하여야 하는 특징이 있어 이에 따라 각종 첨가제 및 안정제를 섞어 유연성을 높여 제조하는 특징이 있다. 고온시료의 표면의 경우 장시간 물과 접촉하여 각종 첨가물이 복합된 절연피복에서 물 접촉에 의한 분자들이 분리되어 겔상으로 변화하여 분해됨에 따라 규칙적인 구조형태를

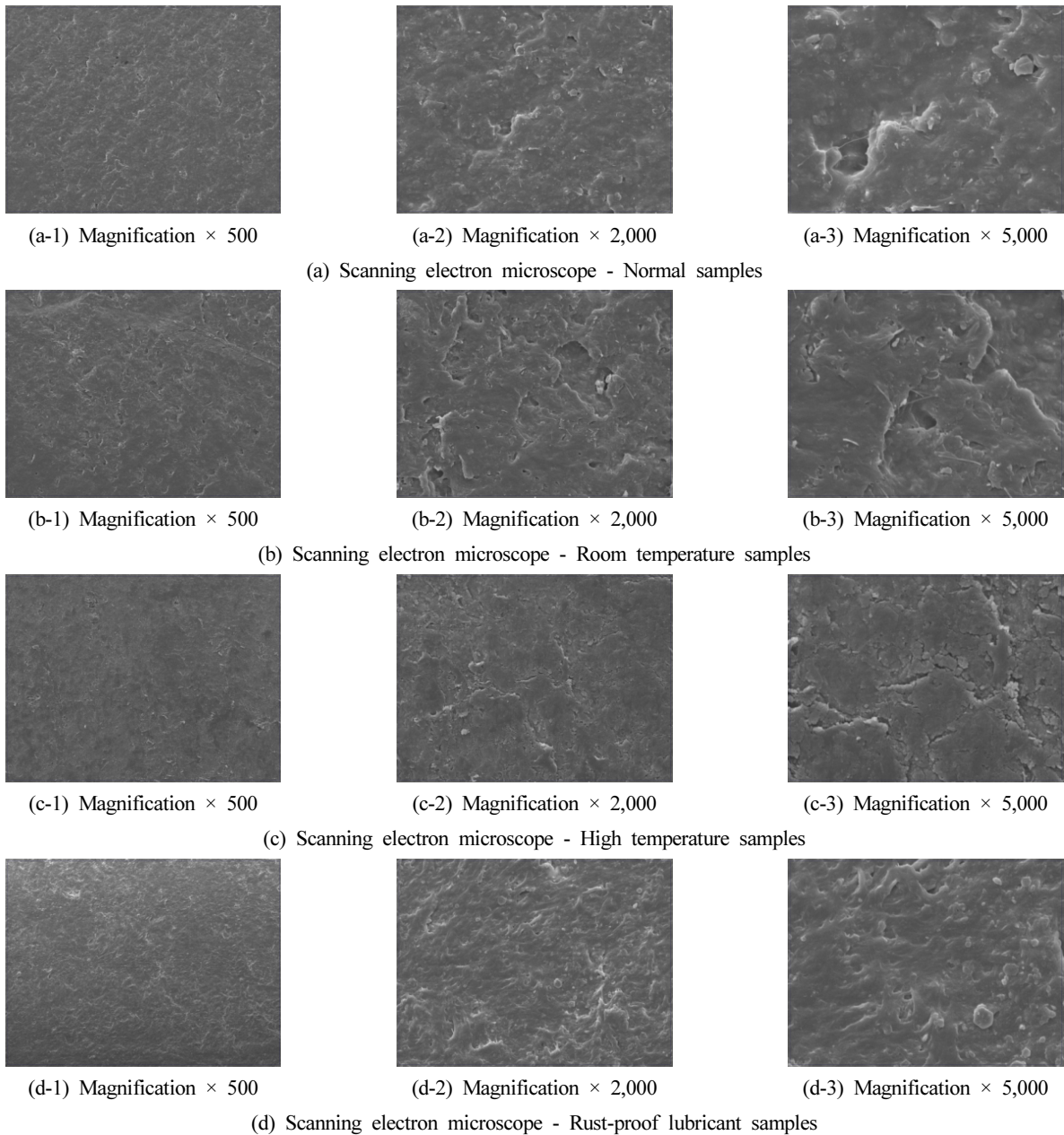


Figure 5. Surface measurement results using scanning electron microscope (SEM).

이루지 못하고 나타난 표면으로 생각되며, 85 °C의 열에 의해 겔 현상 또는 절연열화가 가속화된 것으로 판단된다. 이로 인해 절연피복 전체적으로 피복이 갈라지며 조밀한 형태로 천공이 발생된 것으로 판단된다.

방청윤활제 시료의 경우 수소처리 된 경질 정제유, 석유기유, 프로판, 노르말부탄이 함량 되어있고 장시간 해당 성분 노출됨에 따라 절연재료의 첨가제에 용융·용착이 발생되어 나타나는 현상으로 판단되며 이상과 같은 결과 HFIX 절연전선의 경우 유동성과 작업성이 많은 재료이기 때문에 설치환경에서의 물리적 충격 또는 당김 등에 의해 절연체가 쉽게 파괴되어 절연체 내부의 구리선이 노출되고

이로 인한 전기적 위험성 증가와 절연체의 천공 및 연질화에 따라 크랙 등의 발생되어 크랙 내부에 물 또는 먼지 등에 의한 전기화재 발생 가능성이 높아질 것으로 판단된다.

4.3 HFIX 절연전선 피복의 FT-IR 스펙트럼분석 결과

Figure 6은 HFIX 절연전선의 오염 시료별 피복의 FT-IR 스펙트럼분석을 나타낸 그래프로 Figure 6(a)의 정상상태 시료의 경우 3,500~4,000 peak O-H 결합의 투과율은 0.789로 나타났으며, 3,000~2,840 peak C-H 결합의 투과율은 0.583, 0.646으로 나타났다. 1,738 peak의 C = O 결합의 투과율은 0.785, 1,465 peak의 C-H bend 결합의 투과율은

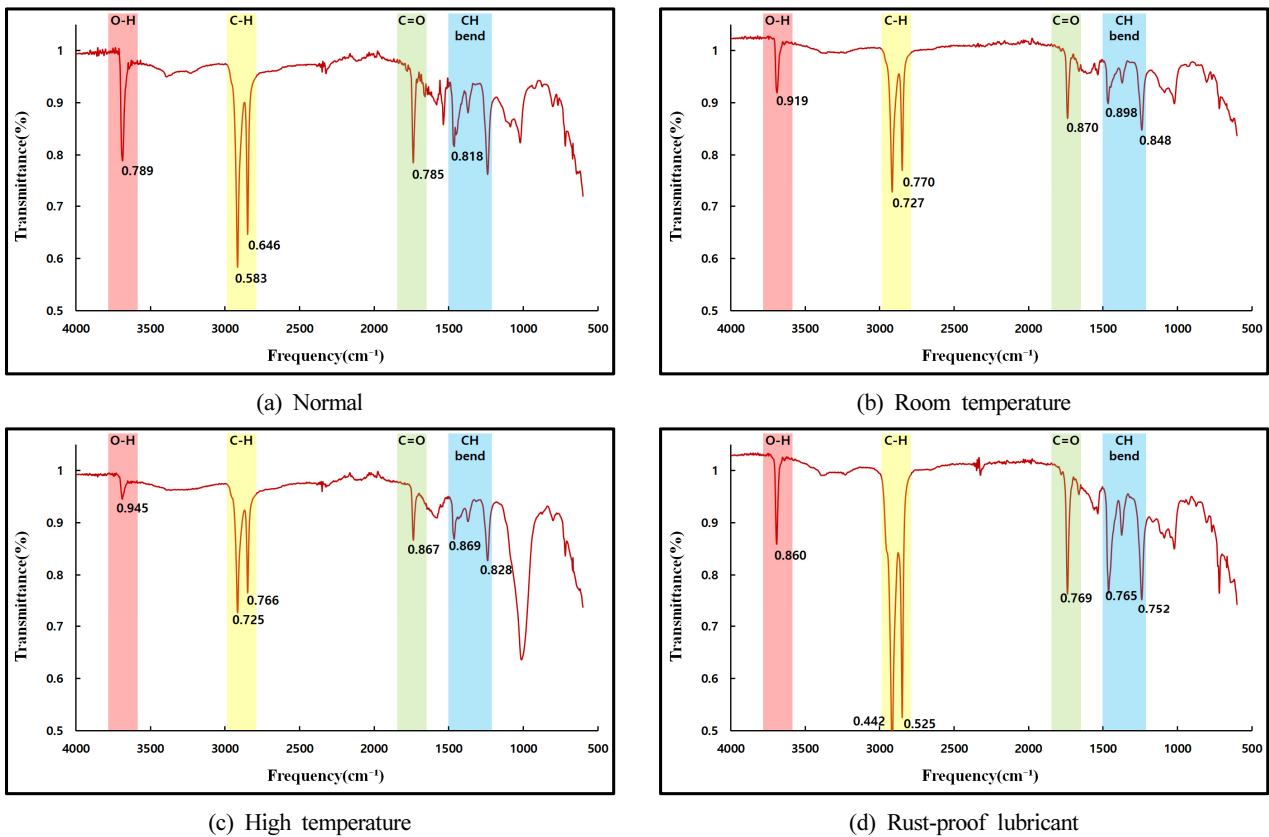


Figure 6. Results of FT-IR spectrum.

0.818로 나타났다. Figure 6(b)는 상온시료 FT-IR 스펙트럼 분석으로 O-H 결합의 투과율은 0.919, C-H 결합의 투과율은 0.727, 0.770, C = O 결합의 투과율은 0.870, C-H bend 결합의 투과율은 0.898로 나타났다. Figure 6(c)는 고온시료 FT-IR 스펙트럼 분석으로 O-H 결합의 투과율은 0.945, C-H 결합의 투과율은 0.725, 0.766, C = O 결합의 투과율은 0.867, C-H bend 결합의 투과율은 0.869로 나타났다. Figure 6(d)는 방청윤활제 시료 FT-IR 스펙트럼 분석으로 O-H 결합의 투과율은 0.860, C-H 결합의 투과율은 0.442, 0.525, C = O 결합의 투과율은 0.769, C-H bend 결합의 투과율은 0.765로 나타났다.

Table 2는 정상시료 기준 시료별 증감률로 정상시료 기준으로 상온시료의 경우 O-H peak가 16.47% 투과율이 축소되어 발생되었고, C-H peak는 각각 24.69%, 19.20% 축소되었다. 또한 C = O peak는 10.83%, C-H bend는 9.78% 투과율이 축소된 것을 확인할 수 있었는데 기존 가교 구조를 이루고 있던 올레핀계 분자들의 가교가 끊어지면서 분자들 사이에 물분자가 침투 및 결합하여 친수성이 커진 것으로 판단된다. 또한 물 분자와 올레핀계 분자들의 흡습현상으로 인해 기존구조를 이뤘던 분자들이 분해·결합됨에 따라 기존에 반응할 수 있던 분자들이 물 분자에 의해 구조가 변경되면서 해당 투과율이 하락한 것으로 판단된다.

정상시료 기준으로 고온시료의 경우 O-H peak 19.77%,

C-H peak는 각각 24.36%, 18.58%, C = O peak는 10.45%, C-H bend는 6.23%로 전체 투과율이 축소된 것을 확인할 수 있었다. 이는 상온시료와 같은 원인으로 인해 전체 투과율이 정상시료에 비해 축소된 것으로 판단된다. 또한 고온시료의 경우 상온시료보다 O-H peak 투과율이 더욱 축소된 원인으로는 85 °C 고온수분의 환경적 열화에 의한 첨가제 및 안정제의 산소성분을 더욱 가속화하여 분해시키고, 올레핀 구조사이에 균일하게 침투되어 있는 첨가제 및 안정제 등의 성분이 열에 의해 열화 되면서 분해·이탈됨에 따라 분자간의 결합력이 저하되고 변색되면서 HFIX 절연전선의 표면에 갈라짐 및 친공발생의 원인으로 작용되어 최대인장하중 감소, 신장률 감소 등의 기계적 성질이 저하된 것으로 판단된다.

정상시료 기준으로 방청윤활제의 경우 O-H peak 9% 투과율 축소, C-H peak는 각각 24.19%, 18.73%, C = O peak는 2.04%, C-H bend는 6.48% 투과율이 확대되었다. 방청윤활제의 경우 상온시료 및 고온시료와 반대로 C-H peak에서 급격히 확대되는 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 방청윤활제의 수소처리된 경질 정제유, 석유기유, 프로판, 노르말부탄의 성분에 의한 HFIX 절연전선의 피복 특성이 용융 및 분해되면서 재결합하여 나타나는 확대 peak로 판단되고, 이에 따라 투과율 증가에 의한 기계적 강도가 상승한 것으로 판단될 수 있다. 하지만 4.1절에서 방청윤활제의 접촉기

Table 2. Rate of Increase and Decrease for Each Sample Based on Normal Samples

Structure (%)	Normal				
	O-H Peak	C-H Peak(1)	C-H Peak(2)	C = O Peak	CH Bend
Room temperature	-16.47	-24.69	-19.20	-10.83	-9.78
High temperature	-19.77	-24.36	-18.58	-10.45	-6.23
Rust-proof lubricant	-9.00	+24.19	+18.73	+2.04	+6.48

간에 따라 최대인장하중이 더욱 감소되는 것은 HFIX 원재료인 PE, PP의 경우 단단한 플라스틱 구조이기 때문에 기존 결합에서 C-H peak, C-H bend 확대가 절연체를 단단하게 만들어 유연하게 만드는 첨가제의 역할이 상쇄된 것으로 판단된다.

이상과 같은 결과 HFIX 절연전선은 국내 건축물에 사용되고 있기 때문에 한번 설치 후 제품 교체 시 까지 수년 이상 경과되는 것을 생각하면 내후성, 절연성, 신축성이 확보되어야 한다. 하지만 HFIX 절연전선의 경우 실험결과 모든 오염물질에 의한 성능저하가 발생되었고 1주간 오염물에 접촉 노출되어도 성능저하가 발생하는 것으로 보아 지속적인 결로현상 또는 노후 건축물에 취약성 및 위험성이 증대될 것으로 생각된다. 이러한 오염물질 접촉시간이 증가될수록 절연체 유연성 및 신장률이 감소되고 절연체의 기계적 성능이 저하되어 누전, 합선 등 전기적 위험성이 증가될 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 HFIX 절연전선의 오염물질에 따른 절연피복의 성능변화에 관한 연구로서 시공상 및 시공 후 발생하는 문제점을 통해 오염물질을 선정하여 오염물질 노출 실험을 통해 1주, 2주, 3주, 4주 오염된 시료를 제작하고 절연피복의 성능변화를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대인장하중 및 신장률 측정결과 최대인장하중은 오염노출 기간이 증가됨에 따라 4주간 오염 노출된 상온시료에서 최대 6.22% 감소, 고온시료에서 6.52% 감소, 방청윤활제에서 19.94% 감소되었다. 또한 파단시간 및 신장률 및 늘어난 길이(ΔL) 측정 결과 오염노출 기간이 증가됨에 따라 모두 감소되어 파단시간은 상온시료의 경우 2 s 감소, 고온시료의 경우 6 s 감소, 방청윤활제의 경우 13 s 감소, 신장률 및 늘어난 길이(ΔL)는 상온시료의 경우 ΔL 68.13 mm (신장률 240.65%), 고온시료의 경우 ΔL 60.69 mm (신장률 203.45%), 방청윤활제의 경우 ΔL 46.68 mm (신장률 133.4%)로 급격하게 감소하였다.

2. 주사전자현미경 표면분석 결과 상온시료, 고온시료에는 피복표면이 갈라지는 형태와 조밀한 형태로 천공이 발생된 것을 확인할 수 있었고, 방청윤활제의 경우 기존에 뭉친 입자들의 표면이 용융·응축이 발생되어 절연피복 표면이 사방으로 분출되어 밀리고 퍼지는 현상을 확인 하였다.

3. HFIX 절연전선 피복의 FT-IR 스펙트럼 분석결과 상온시료의 경우 O-H peak가 16.47%, C-H peak는 각각 24.69%, 19.20%, C = O peak는 10.83%, C-H bend는 9.78% 투과율이 축소되었고, 고온시료의 경우 O-H peak 19.77%, C-H peak는 각각 24.36%, 18.58%, C = O peak는 10.45%, C-H bend는 6.23%로 전체 투과율이 축소된 것을 확인할 수 있었다. 이는 물 분자와 올레핀계 분자들의 흡수현상으로 인해 기존 구조를 이뤘던 분자들이 분해·결합됨에 따라 투과율이 하락한 것으로 판단되고, 반대로 방청윤활제의 경우 O-H peak 9% 투과율 축소, C-H peak는 각각 24.19%, 18.73%, C = O peak는 2.04%, C-H bend는 6.48% 투과율이 확대되었는데, 이는 방청윤활제의 수소처리된 경질 정제유, 석유기유, 프로판, 노르말부탄의 성분에 의한 HFIX 절연전선의 피복 특성이 용융 및 분해되면서 재결합하여 나타나는 확대 peak로 판단되고 이로 인하여 기존 결합에서 C-H peak, C-H bend 확대가 더욱 절연체를 단단하게 만들어 유연하게 만드는 첨가제의 역할이 상쇄된 것으로 판단된다.

이상과 같은 결과 HFIX 절연전선의 경우 오염요인이 인가되지 않으면 우수한 성능을 가지고 있는 옥내용 절연전선이지만, 장시간 수분 및 방청윤활제에 노출·오염되었을 경우 전체적인 특성변화로 인하여 절연전선의 성능이 저하되어 실제 전기화재 등의 사고가 발생 될 수 있을 것이라 예상된다.

따라서 본 연구를 통해 도출된 오염물질에 따른 절연전선 피복의 특성 변화 결과값을 기초데이터로 사용하여 절연전선의 성능저하를 방지하기 위해 검사주기 및 보수시기의 마련이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2019년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(20190403).

References

1. Ministry of Public Safety and Security, "National Fire Information Center E-Fire Statistics" (2019).
2. M. S. Hwang, M. Y. Lee, J. C. Lee, D. S. Shin, Y. S. Kim and J. C. Kim, "Analysis of Contruction Problems about HFIX and Study of Improvement Method on Electric Wire

- and Cable in Low Voltage Electric Equipment of Integrated Test-site Based on IEC 60364”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation, Vol. 30, No. 9, pp. 56-63 (2016).
3. KS C IEC 60811-1-1, “Common Test Methods for Insulating and Sheathing Materials of Electric Cables -Part 1: Methods for General Application - Section 1: Measurement of Thickness and Overall Dimensions - Tests for Determining the Mechanical Properties” (1993).
 4. KS C IEC 60227-2, “Polyvinyl Chloride Insulated Cables of Rated Voltages up to and Including 450/750 V - Part 2: Test Methods” (2003).
 5. KS C IEC 60227-3, “Polyvinyl Chloride Insulated Cables of Rated Voltages up to and Including 450/750 V - Part 3: Non-sheathed Cables for Fixed Wiring” (2005).
 6. <https://www.scienceall.com/폴리염화비닐polyvinyl-chloride/> (2015).
 7. <https://www.scienceall.com/가교고분자-cross-linking-polymer-架橋高分子/> (2017).
 8. Korea Water Resources Corporation, K-water, “mywater water Encyclopedia Aluminum Hydroxide” (2016).
 9. <http://blog.naver.com/ad1628/220841402193> (2016).
 10. KS C IEC 60811-1-3, “Common Test Methods for Insulating and Sheathing Materials of Electric and Optical Cables - Part 1-3: General Application -Methods for Determining the Density - Water Absorption Tests - Shrinkage Test” (2002).
 11. http://pdf.electimes.com/201707/24_3318_11.pdf (2017).
 12. <https://blog.naver.com/hhs4040/221421332116> (2018).