

트레이용 난연 전력 케이블의 화재특성에 관한 실험적 연구

김성찬[†] · 김정용 · 방경식^{*}

경일대학교 소방방재학과 · *한국원자력연구원
(2013. 2. 19. 접수 / 2013. 5. 21. 채택)

Experimental Study of Fire Characteristics of a Tray Flame Retardant Cable

Sung Chan Kim[†] · Jung Yong Kim · Kyoung Sik Bang^{*}

Department of Fire Safety, Kyungil University · *Korea Atomic Energy Research Institute
(Received February 19, 2013 / Accepted May 21, 2013)

Abstract : The present study has been conducted to investigate the fire combustion properties and fire behavior of an IEEE-383 qualified flame retardant cable. The reference reaction rate and reference temperature which are commonly used in pyrolysis model of fire propagation process was obtained by the thermo-gravimetric analysis of the cable component materials. The mass fraction of FR-PVC sheath abruptly decreased near temperature range of 250~260°C and its maximum reaction rate was about 2.58×10^{-3} [1/s]. For the XLPE insulation of the cable, the temperature causing maximum mass fraction change was ranged about 380~390°C and it has reached to the maximum reaction rate of 5.10×10^{-3} [1/s]. The flame retardant cable was burned by a pilot flame meker burner and the burning behavior of the cable was observed during the fire test. Heat release rate of the flame retardant cable was measured by a laboratory scale oxygen consumption calorimeter and the mass loss rate of the cable was calculated by the measured cable mass during the burning test. The representative value of the effective heat of combustion was evaluated by the total released energy integrated by the measured heat release rate and burned mass. This study can contribute to study the electric cable fire and provide the pyrolysis properties for the computational modeling.

Key Words : tray flame retardant cable, thermo-gravimetric analysis, heat release rate, heat of combustion

1. 서론

케이블 화재는 전기적 결함을 비롯한 다양한 원인에 의해 점화되어 화재가 시작되는 원인인 동시에 케이블을 통한 주변 가연물로의 화재확산을 유도하는 매개체의 역할을 수행하기 때문에 많은 대형 전기 화재사고가 케이블 화재와 관련되어 있다. 특히 원자력 발전소와 같이 잠재적인 위험 요소가 매우 큰 시설물의 경우 케이블에서 발생한 화재가 전체 원자력 발전소 안전에 심각한 영향을 미치게 되는데 최근의 국제원자력기구(IAEA)의 사고보고시스템(IRS, Incident Reporting System) 자료에 따르면 많은 원자력 안전관련 사고원인이 케이블을 포함한 전기장치의 화재에 기인하고 있으며 인도나 독일의 경우 원자력 발전소 화재사고의 50% 정도가 전기장치 및 케이블에서 발생하는 것으로 보고되고 있다^{1,2)}. 따라서 전기시설물의 화재안전을 확보하기 위해서는 전기장치 및 케이블의 발화와 화재발달과정에 관한 이해가 매우 중요하다. 미국 원자력규제위원회(U. S. Nuclear Regulatory Commission)에서는 케이블의 내화 시험 여부에 따라 IEEE-383 인증 케이블과 비인증 케이블로 구분하여 원자력 시설물 내 화재 위험 평가과정에서 케이블 화재와 관련된 다양한 화재시나리오를 제시하고 있다^{3,4)}. 또한 케이

블 화재는 케이블 자체에서 발화된 경우와 용접이나 절단 등의 외부적 요인에 의해 케이블에 점화가 발생한 것으로 구분하고 있다. 이를 바탕으로 화재 위험성 평가에 적용되는 화재시나리오는 발화원, 가혹도 계수(severity factor)에 따른 화재강도, 케이블의 묶음정도 등 다양한 요소를 고려하여 케이블 화재를 해석하는 정성적인 방법을 제시하고 있다^{3,5)}. 그러나 케이블 화재 전파 및 외부 열원에 의한 발화등에 관한 상세 해석이나 가연물의 열해리(pyrolysis) 모델을 적용한 수치해석을 수행하기 위해서는 해석 대상 케이블의 열해리 및 연소 특성과 관련된 물성자료를 필요로 한다⁶⁾. Hietaniemi 등⁷⁾은 PE/XLPE 케이블에 대하여 열해리 물성을 적용하여 단순화된 케이블 트레이 화재 전파를 FDS 4를 이용하여 해석한 결과 화재전파에 따른 발열량과 공간내의 온도분포에서 실험결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다. 그러나 케이블은 용도에 따라 케이블을 구성하는 물질이나 조성에 차이가 있기 때문에 기존 물성을 활용하는데 한계가 있으며 대상케이블의 열 및 연소물성을 직접 측정하여 적용함으로써 케이블 화재해석의 신뢰성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 파일럿 점화에 의해 발화된 IEEE-383 시험 인증된 트레이용 케이블의 초기 화재특성을 실험적 규

[†]Corresponding Author: Sung Chan Kim, Tel : +82-53-600-5405, E-mail : sungkim@kiu.ac.kr
Department of Fire Safety, Kyungil University, 50, Gamasil-gil, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do 712-701, Korea

모의 시편실험을 통해 파악하고 열해리 및 연소 물성을 실험적으로 측정하여 케이블 화재 해석을 위한 물성을 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1. 트레이용 난연 케이블

실험대상 케이블은 트레이용 난연 케이블 (Tray Flame Retardant Cable)이며 수직 트레이에서 파일럿 점화에 의한 IEEE-383 난연 시험을 만족한다. 시험 케이블은 구리 소재의 도체(conductor), XLPE소재의 내부 절연체 (insulation), 충전제(filler) 그리고 고난연성 PVC 소재의 외부 쉬스체(sheath)로 구성되며 Fig. 1은 케이블의 단면 사진을 나타낸다. 케이블 시편의 외경은 16 mm, 절연체 두께는 0.7 mm, 쉬스체 두께는 1.8 mm, 도체 외경은 3.1 mm 정도이다. 케이블 각 요소들의 구성비를 파악하기 위하여 분해능이 1 mg 인 정밀저울을 이용 1 cm 길이의 실험 케이블 시편에 대해 각 구성 요소의 개별 질량을 측정하였다. Table 1은 케이블 구성요소의 측정질량과 질량분율을 나타낸다. 케이블 구성요소 가운데 전체 질량의 절반정도가 구리도체이며 약 30% 정도가 외부 쉬스체이며, 내부 절

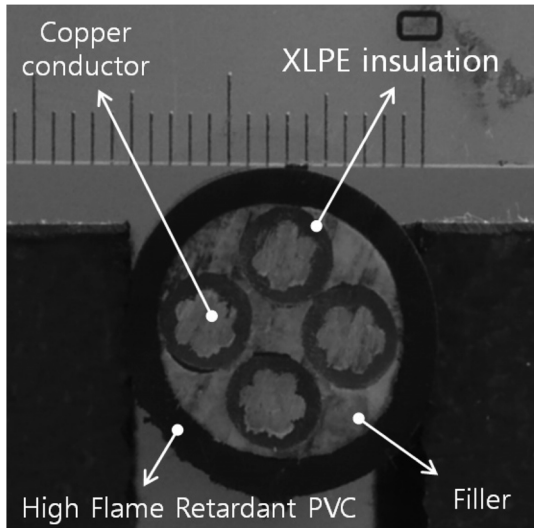


Fig. 1. Cross-section image of the tested cable with IEEE-383 qualification.

Table 1. The mass fraction of each component of the tested cable.

Component	Mass [g]	Mass Fraction
Sheath (FR-PVC)	1.077	0.272
Filler	0.356	0.090
Insulation (XLPE)	0.369	0.093
Conductor (Copper)	2.154	0.544
Total	3.956	1.000

연체와 충전제는 10% 미만인 것으로 나타났다. 케이블 코어(core)수에 따라 차이가 있지만 전체적으로 케이블 질량의 절반정도를 가연성 물질로 간주할 수 있다.

2.2. 열중량분석 및 화재실험

열적조건에 따른 케이블 구성요소의 반응특성을 파악하기 위하여 열중량분석(TGA, Thermo- Gravimetric Analysis)을 수행하였다. 열중량 분석은 주어진 온도변화에 따른 중량변화를 측정하여 가연물의 열해리특성을 파악할 수 있다. 열중량 분석은 TA Instrument 사의 Q600 모델이며 시편의 최대질량은 200 mg, 저울의 민감도는 0.1 μg이다. 실험은 공기조건에서 수행되었으며 가열율(heating rate)은 10 °C/min, 최대가열온도는 600°C 이다. 시편의 초기질량(m_o)에 대한 온도변화에 따른 측정 시편의 질량(m)의 비는 시편요소의 질량분율로 다음과 같이 정의된다.

$$Y_c = \frac{m}{m_o} \quad (1)$$

FDS와 같은 화재해석 프로그램의 열해리 모델에서는 반응율이 피크값을 가지는 온도를 기준온도(reference temperature, T_p)로 정의하고 이때의 최대반응율을 기준반응율(reference reaction rate, r_p)로 정의한다⁸⁾.

$$r_p = \left(\frac{dY_c}{dt} \right)_{\max} \quad (2)$$

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 파일럿 점화에 따른 케이블의 화염전파 실험은 직경이 40 cm 인 콘형 후드 아래에서 수행되었다. 케이블의 점화는 직경이 3 cm 인 Meker 버너를 이용하였고 사용된 연료는 메탄가스이며 공급되는 유량은 MFC에 의해 제어된다. 화재실험 중에 발생된 연

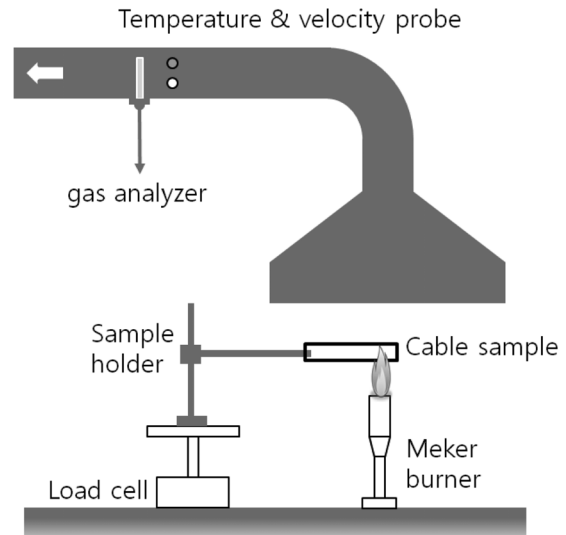


Fig. 2. Schematic of the cable fire testing apparatus.

소가스는 후드 및 배기덕트를 통해 외부로 배출되며 배기덕트부에서의 유속, O₂, CO, CO₂ 등의 가스농도 및 온도측정이 이루어진다. 연소과정중의 화재발열량은 산소소모법(Oxygen depletion factor)을 적용하여 다음과 같이 산정된다⁹⁾.

$$\dot{Q}_{chem} = (\Delta H_{c,O_2})\phi \frac{\dot{m}_g}{1 + \phi(\alpha - 1)} (1 - X_{H_2O}^o) X_{O_2}^o \frac{MW_{O_2}}{MW_{air}} \quad (3)$$

화재실험중 케이블의 연소에 따른 질량변화는 0.1 g 해상도의 로드셀을 이용하여 측정하였으며 케이블의 거시적인 화재특성 및 열영상은 디지털 캠코더 및 FLUKE사의 TI-45를 이용하였다.

3. 결과

Fig. 3은 실험대상 난연 케이블의 온도변화에 따른 질

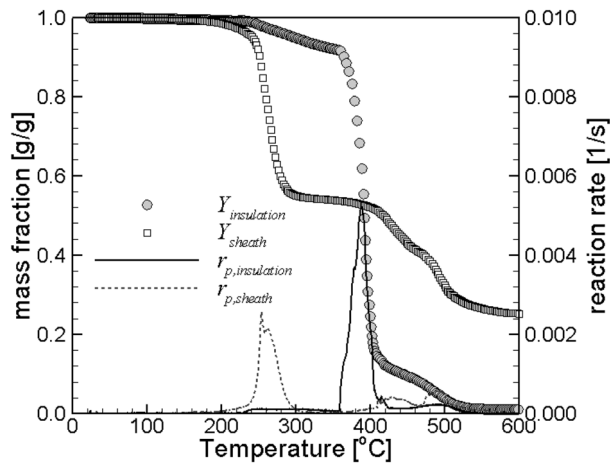


Fig. 3. Mass fraction and reaction rate data from TGA for the FR-PVC sheath and XLPE insulation of the sample cable.

Table 2. Summary of the TGA result for the tested cable component.

Material	heating rate [°C/min]	reference temperature [°C]	reaction rate [s ⁻¹]
FR-PVC Sheath	10	254	2.58×10 ⁻³
XLPE insulation	10	387	5.10×10 ⁻³

량감소비와 반응율의 변화를 나타낸다. 각 온도에 대한 반응율은 시간변화에 대한 질량분율의 변화값으로 계산되었다. FR-PVC 쉬스체의 경우 질량분율의 급격한 변화가 250~260°C에서 나타났으며 이때의 최대반응율은 2.58×10⁻³ [s⁻¹]으로 측정되었다. 일반적으로 공기나 질소조건에서 PVC 내 염화수소(HCl)가 방출되는 온도는 약 250~300°C 알려져 있으며¹⁰⁾ 본 실험에서도 전체 FR-PVC 쉬스체 질량의 약 45%정도가 이 온도 범위에서 감소하는 것으로 나타났다. 실험대상 FR-PVC 쉬스체의 열중량 분석결과는 이전의 연구에서 수행된 측정결과와 유사한 결과를 제공하고 있다¹¹⁾. XLPE 절연체는 250°C 이상에서 서서히 질량감소가 일어나고 350~400°C 사이에서 가장 급격한 질량분율의 변화를 나타냈으며 최대 반응율은 5.1×10⁻³ [s⁻¹]으로 측정되었다.

한편 FR-PVC 쉬스체의 25% 정도는 600°C 범위에서 반응이 일어나지 않고 잔존물(residue)로 남았으나 XLPE 절연체는 600°C에서 잔존물이 약 1% 정도로 대부분 600°C 이내에서 열분해 반응이 일어나는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 단일 난연 케이블의 파일럿 점화과정에서 시간에 따른 케이블 화염전파의 가시영상과 열영상을 비교하여 나타낸다. 열영상에서 흰색으로 보이는 부분은 350°C를 초과한 부분을 나타낸다. 점화 이후 화염전파 초기에는 케이블에서 생성되는 가연성 연료증기에 의해 화염이 상대적으로 크지만 FR-PVC 소재의 난연성으로 인해 케이블 길이방향으로의 화염전파는 제한되어 화염의 크기는 점차 감소하게 된다. FR-PVC 쉬스체의 타지 않은 잔존물은 점차 증가하여 열화상에서 고온의 고체표면적은 증가하게 된다.

파일럿에 의해 점화된 케이블은 파일럿 부근에서 활발

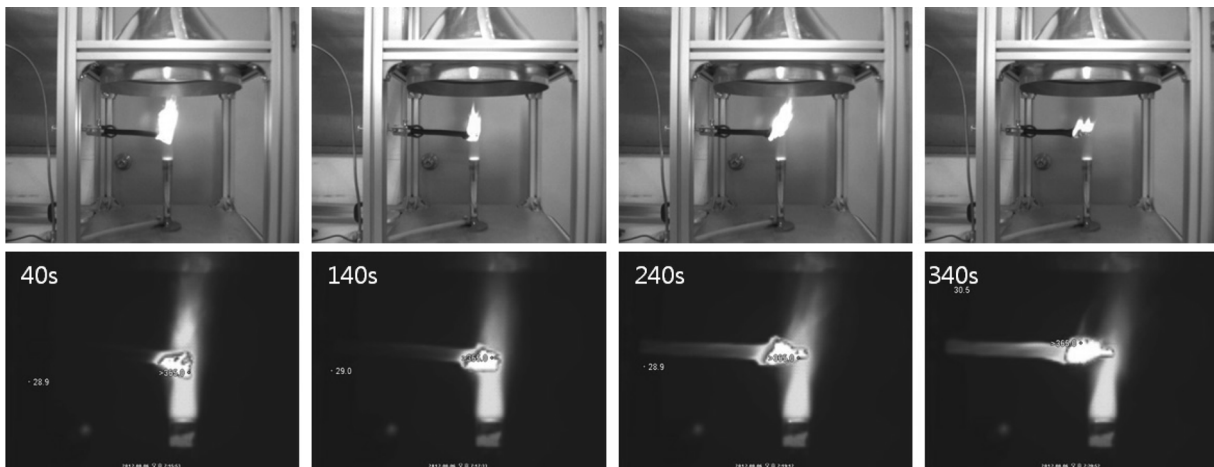


Fig. 4. Comparison of visible and thermal images during the fire test for a IEEE-383 qualified cable.

한 연소가 일어나며 케이블을 따라 화염전파가 일어나지만 화염면이 파일럿에서 멀어짐에 따라 케이블의 난연성에 의해 화염은 점차 약화되어 약 6분 정도가 경과하면 화염은 케이블의 내부 절연체 부근에서만 매우 약한 화염을 유지하였다. 이때 화염경계부로 버너를 이동하여 열에너지를 공급하면 화염은 다시 확대되고 발열량은 증가하지만 화염 전파면이 파일럿에서 멀어지면 화염은 약화되어 소멸되었다. 따라서 난연성 케이블의 경우 초기 점화원에 의해 점화가 일어나지만 지속적인 외부 열에너지의 공급이 이루어지지 않을 경우 화재확산은 제한적인 것으로 나타났다. Fig. 5는 단일 난연 케이블의 연소 후 잔존물 사진을 보여준다.

Fig. 6는 단일 난연 케이블의 화재실험과정에서 측정된 발열량과 케이블의 질량감소를 시간에 따라 나타낸다. 케이블의 점화는 파일럿 버너 점화후 약 6분 경과 후에 이루어지며 파일럿 버너의 기준 발열량은 케이블 점화전 약 180 초 정도의 정상상태 구간에 대해 산소소모법에 의해 측정된 값을 평균하여 약 1.66 ± 0.05 kW 정도로 산정되었다. 케이블 점화 후 360초까지 단일 케이블의 질량은 비교적 선형적으로 감소하였으며 평균 질량감소율은 0.01 kg/s 정도로

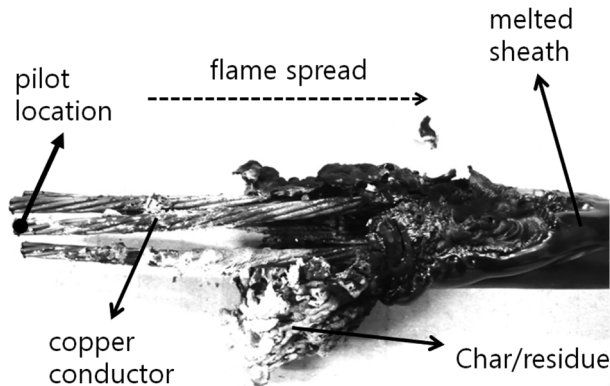


Fig. 5. Image of the burned cable.

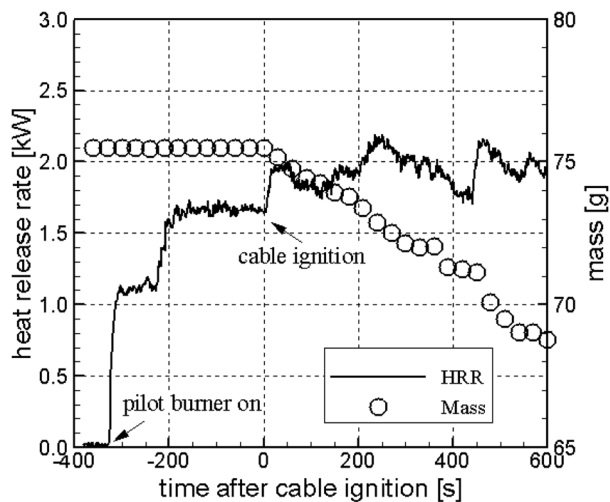


Fig. 6. The measured heat release rate and mass of a tested cable during the fire test.

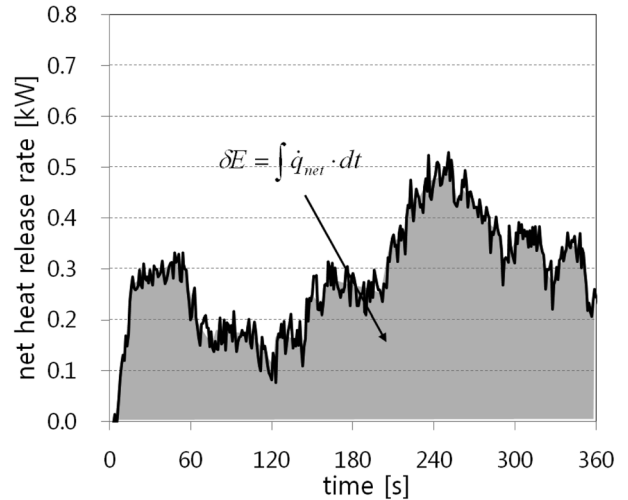


Fig. 7. Calculation of the total energy released from the burning cable by integrating the net heat release rate.

계산되었다. 화재 실험동안 케이블의 발열량은 전체 화재실험에서 측정된 발열량에서 버너의 평균발열량을 뺀 값으로 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_t - \dot{q}_{burner} \quad (4)$$

Fig. 7은 파일럿에 의한 점화이후 단일 시편 케이블의 순발열량(net heat release rate)을 나타낸다. 순간 최대발열량은 점화 후 약 4분 경과시 약 0.5 kW 정도를 측정되었으며 케이블의 초기점화 기간 동안(0 s - 300 s) 방출된 총 열에너지는 순발열량을 시간에 대해 적분하여 얻을 수 있다.

$$\Delta E = \int_{t=0}^{t=300s} \dot{q}_{net} dt \quad (5)$$

계산된 총 열에너지는 83 kJ이며 이 시간동안의 질량감소량을 고려하여 케이블 화재점화 초기의 평균연소열은 약 24,800 kJ/kg 정도로 계산되었다.

4. 결론

본 연구는 트레이용 난연성 케이블 화재의 특성을 평가하기 위한 기초연구로 IEEE-383 시험 인증된 트레이용 케이블의 구성 물질에 대한 TGA 분석을 통해 열해리 물성을 파악하고 실험실 규모의 시편화재실험을 통해 초기 화재특성을 파악하여 케이블 화재 해석을 위한 물성 자료를 제공하고자 한다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) TGA 분석결과, FR-PVC 쉬스체의 경우 주요열해리 반응이 일어나는 기준온도는 250~260°C, 최대반응율은 2.58 × 10⁻³ [s⁻¹]으로 측정되었으며 600°C까지 가열하는 과정에서

잔존물의 양은 초기 가연물 질량의 약 25% 정도가 남는 것으로 나타났다. XLPE 절연체의 기준온도는 390°C 정도, 최대 반응율은 $5.1 \times 10^{-3} [s^{-1}]$ 으로 측정되었으며 잔존물의 질량분율은 1% 이하로 대부분이 600°C 이하에서 열분해 반응이 일어나는 것으로 나타났다.

2) 파일럿에 의해 점화된 케이블 시편은 버너 부근에서 활발한 초기 연소가 일어나며 케이블을 따라 화염전파가 이루어지지만 화염면이 파일럿에서 멀어짐에 따라 버너에서 가해지는 열전달 양이 감소하고 케이블의 난연성에 의해 화염은 점차 약화되어 약 6분 정도가 경과하면 화염은 케이블의 내부 절연체 부근에서만 매우 약한 화염을 유지한 후 소화되었다.

3) 단일 케이블 시편의 순발열량은 최대 약 0.5 kW 정도로 측정되었으며 초기점화 5분간 순발열량을 적분하여 방출된 총 열에너지를 산정하였다. 이 시간동안의 질량감소량을 고려하여 산정한 케이블 화재점화 초기의 평균연소열은 약 24,800 kJ/kg 으로 계산되었다.

본 연구는 난연성 케이블에 대한 열해리 및 연소물성을 측정하여 케이블의 초기 화재특성을 이해함과 동시에 화재거동 해석을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

감사의 글: 이 논문은 ITER 국제기구 TA 중장기과제 (TA-FC-IPT-KO-12/01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- 1) O. K. Rahkonen and J. Mangs, Bertrand, R. and M. Rowekamp, "Fire Induced Damages to Electrical Cables and Fire Growth on Cables", EUROSAFE Forum 2002, Seminar 1, 2002.
- 2) IAEA, "Experience Gained from Fires in Nuclear Power Plants:

- Lessons Learned", IAEA-TECDOC- 1421, 2004.
- 3) EPRI/NRC-RES, "Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities", NUREG/CR-6850, 2005.
- 4) IEEE Power Engineering Society, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations", IEEE Std 383, 2003.
- 5) H. S. Lim and D. Y. Kim, "A Study on Heat-Flux Evaluation for Cable Fire Including Diagnostic Methodology for Degradation in Nuclear Power Plants", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 26, No. 2, pp. 20-25, 2011.
- 6) S. C. Kim and S. H. Lee, "Assessment of Grid Sensitivity in the FDS Field Model to Simulate the Flame Propagation of an Electric Cable Fire", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 23, No. 4, pp. 30-35, 2008.
- 7) J. Hietaniemi, S. Hostikka and J. Vaari, "FDS Simulation of Fire Spread - Comparison of Model Results with Experimental Data", VTT Working Papers 1459-7683, pp. 33-38, 2004.
- 8) K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, 2010.
- 9) R. A. Bryant, T. J. Ohlemiller, E. R. Johnsson, A. Hamins, B. S. Grove, Guthrie, G. W., Maranghides, A. and Mulholland, G. W., "The NIST 3MW Quantitative Heat Release Rate Facility - Description and Procedures", NISTIR-7052, 2004.
- 10) W. A. Al-Sayegh, O. Aljumaih, G. E. Andrews and H. N. Phylaktou, "Electrical Cable Fires Using the Cone Calorimeter for Toxic Gas Investigations", 6th Fire and Explosion Hazards Seminar, University of Leeds, 2010.
- 11) Q. Xie, H. Zhang and L. Tong, "Experimental Study on the Fire Protection Properties of PVC sheath for old and new cables", Journal of Hazardous Materials, Vol. 179, No. 9, pp. 373-381, 2010.