

가전제품 화재 메커니즘 재현 및 분석을 위한 인프라 구축

장인혁¹ · 이창훈² · 이영주² · 임홍우^{2*}

¹조선대학교, ²한국기계전기전자시험연구원

The Infrastructure Case for Reproduction or Analysis of The Mechanism on The Fire of The Electrical Appliances

In-Hyeok Jang¹ · Chang-Hoon Lee² · Young-Joo Lee² · Hong-Woo Lim^{2*}

¹Chosun University, ²Korea Testing Certification

In this paper, The infrastructure case for reproduction or analysis of the mechanism on the fire or the electric shock of the electrical appliances is proposed. The various electrical appliances(Washing machine, Ballast, Electric heaters, Electronic switches, Mobile phone chargers) used in the home can be tested on the high voltage and over current test through the implementation of the infrastructure. The electrical tests of fire and electric shock consists of the high voltage of maximum 5000 V and over current test of 3 steps(90 A, 60 A, 40 A) and noise test. The mechanism of the fire and the electric shock tests reproduced are analyzed through the monitoring system and the oscilloscope. The electronics manufacturers can prevent accidents through the tests of the electronics factor reproduced and the analysis of the infrastructure designed.

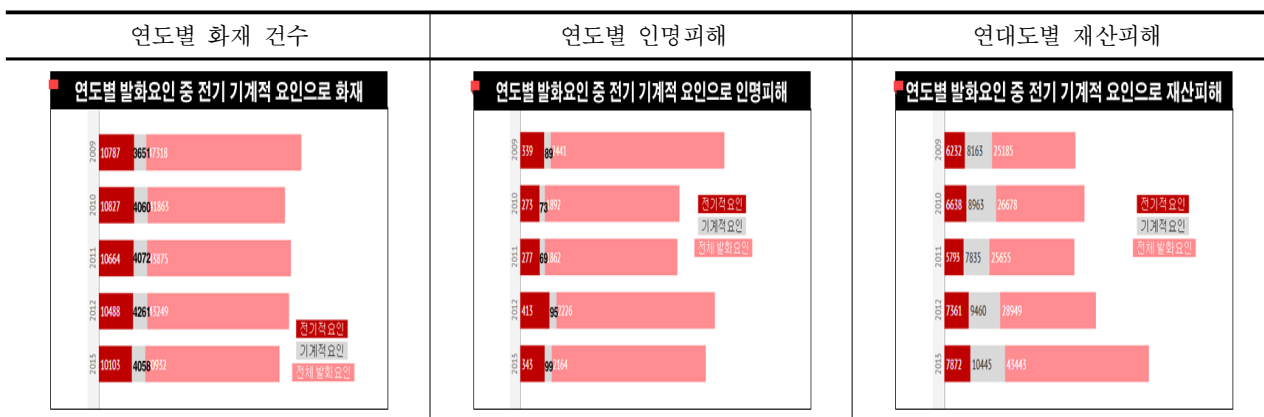
Keywords: Appliance, Fire, Infrastructure, Electric Shock, Mechanism

1. 서론

최근 산업의 발전과 국민소득의 증대로 인해 가전제품의 보급이 증가하는 추세를 보이고 있고, 이에 따라 가전제품의 안전사고 역시 증가하고 있는 추세이다. 가전제품의 전기·

기계적 요인으로 인한 화재의 피해현황은 소방방재청(2014, 2013) 자료를 참고한 <표 1>과 같다. 전체 발화 요인 중 연평균 34%(약 14,500여 건) 화재 건수, 20%(400여 명)의 인명피해, 30%(9,000여억 원)의 재산 피해를 발생 하며, 연도별 전기 기계적 요인으로 인한 전체 발화 요인 중에서도 높은 비중

<표 1> 연도별 전기 기계적 피해현황



* 교신저자 diamond@ktc.re.kr

2014년 12월 4일 접수; 2015년 1월 18일 수정본 접수; 2015년 1월 24일 게재 확정.

을 차지하고 있다. 증가하는 위험도에 반해, 사고와 관련된 여러 기관 및 단체에서 사고 후 고장의 원인에 대해 현상을 이해하고 대처하는 수준에 한계를 가지고 있으며 최초 화재 원인(발화물 추정)을 조사하는 단계에서 마무리되고 있다(원중수, 1998; 이종호, 2009). 이러한 이유로 인해 송재용(2011)과 최충석(2000)은 제품의 출하단계에서뿐만 아니라 가전제품이 가지고 있는 내구수명 이후 고장발생으로 인해 사고가 발생하더라도 안전을 확보할 수 있도록 시험을 통하여 검증하고 제조물 책임에 대한 지침을 제공할 수 있는 예방활동의 필요성에 관하여 연구하였다. 따라서 본 논문에서는 본 연구원에서 분석한 열화된 가전제품의 FMEA 분석을 통해 일반적인 가전제품의 요소별 주 고장메커니즘을 추정하였고 이를 바탕으로 구현된 인프라를 통해 가정에서 사용하고 있는 안정기, 전열기 등 다양한 가전제품에 대한 최대5000 V의 단계별 전압스텝 과전압시험, 일정한 과전압 인가시험 계통 전압의 노이즈 인가 및 증폭 시험, 3단계 과전류 시험 등의 다양한 재

현시험과 이를 통한 전기화재 및 감전에 대한 메커니즘의 원인 및 분석이 모니터링 시스템을 통한 사례를 기술하였다. 추후 구현된 인프라 시스템을 이용하여 실제 필드에서 노후화된 제품의 화재의 위험성을 줄이기 위해 신제품과 가속시험을 통해 열화된 제품간의 전기적 특성 및 변화를 비교 분석하여 화재 및 감전에 따른 새로운 시험법을 개발할 예정이다(원동주, 2014; 김준성, 2014). 나아가 이 시험법을 바탕으로 관련 제조 기업의 제품안전에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

2. 감전 및 화재 시스템구축

일반적인 가전제품의 경우 품질인증 및 안전인증 등의 초기제품의 안전성 및 품질 검사를 받고 있다. 하지만 제품의 장시간 사용으로 인한 열화품에 대한 품질 및 안전성 평가에

<표 2> 제품 요소별 FMEA

제품요소별 FMEA										
번호	부품 (Unit)	기능	고장형태	발생 빈도	영향	치명도	원인	검지도	RPN	조치방법 및 개선
			회전자 구속	5	자체저항 및 유도리액턴스 변화에 따른 발열로 절연열화 및 발화	9	제품납개 과부화 및 이물질로 인한 회전 구속 전 장애	5	225	
2	기동 콘덴서	기동시 전압 전류 위상차 발생	단락	5	발열및 화재 발생	8	과전압으로 인한 절연 열화	5	200	오염물질 침투방지 코팅
3	트랜스포머	전압 변환 (승/감압) 절연작용	선간 단락	4	과전류로 인한 국부 발열 및 화재	8	과전압으로 권선단락	5	160	코일의 내열성, 내습성 보완을 통한 절연특성 높임
4	스위칭 소자 및 Micom	전류, 전압 제어 및 동작 제어	절연막 파괴	3	오/이상 동작으로 인한 제품과열 유발	7	과전압 인가로 인한 절연 파괴	5	105	제품 설계 마진 확보 부품 단위 검증 제품 설계 마진 확보
			크랙	3			온도변화에 따른 열팽창계수의 차이로 인한 현상 기계적 스트레스	6	126	
			단락	3			열적/전기적 과부화로 인한 절연열화	7	147	
5	PCB	능동/수동 소자의 전기적 연결	트래킹	5	회로 제어 불가 내부 전압 불균형으로 인한 누전 가능성	8	습기 및 먼지의 영향으로 소자간 절연부위에 전기적 단락	4	160	소자 재선정
			이온마이그레이션	4			수분이 흡착된 상태에서 전계의 인가로 이온 이동을 통한 단락	6	192	
			솔더 크랙	5			기계적 스트레스	4	160	

<표 2> 제품 요소별 FMEA 계속

제품요소별 FMEA												
번호	부품 (Unit)	기능	고장형태	발생빈도	영향	치명도	원인	검지도	RPN	조치방법 및 개선		
											6	코일
			접속부 단락	3	발열에 의한 절연파괴 및 권선 연소	8	과전압 인가 기계적 스트레스	4	96	접속부의 재질 개선		
7	제너 다이오드	역바이어스 시 일정한 전압 취득	Drift	4	회로손상 및 주변 회로 열화	3	열적 전기적 과부하	4	48	멀티미터를 이용한 특성측정		
			EOS	5				4	60			
			단락	8				5	120			
			단선	8				5	120			
			균열	4				4	48			
8	바리스터	서지 흡수 및 회로보호	균열	4	주변 회로 열화 및 손상	4	열충격 또는 급격한 온도변화에 의한 현상	4	64	육안검사 전기적 특성 검사		
			저항변화	4				고온 고습 환경, 납땜, 서지에 의해 발생	4		64	
9	휴즈	주 회로 보호	개방	3	회로 동작 불가	5	정격 이상의 과부하에 의한 고장	2	30	전기적 특성측정 부하경감		
10	열선	전류의 흐름에 저항하여 열을 발생하는 재료	용융	8	내부 피복 손상 및 탄화	8	감열 선에 의한 줄열과 열선의 발열량이 합해져 피복의 손상	6	384	육안검사 Multi Meter		
			단락	8				화재			8	보관 부주의 외부 장력
			단선					감전 및 화재			8	보관 부주의 외부 장력
11	저항	전압, 전류 제어	균열성장	4	주변 회로 열화 및 손상, 전기적 특성 변화	3	내부 저항체와 전극간 단선 및 내부 저항체를 보호하는 오버코팅 불량으로 인한 내부 저항체의 전해부식으로 인한 저항값 증대	3	36	MultiMeter사용		
			내외부 전극 연결 불량	3				3	27			
			전해부식	3				3	27			
12	캐패시터	정류·평활 작용, 충·방전	단락	3	회로 손상 및 발화 위험	4	과전압, 과대 리플전류, 역전압 인가	2	24	과전류 계전기나 저항소자의 연결로 과전압, 과도리플로부터의 회로 보호 고용량 소자 사용		
			단선	3				기계적 스트레스	2		24	

발생도: 고장 발생 가능성을 1~10 사이의 값으로 추정
 치명도: 고장이 소비자에게 미치는 영향도 1~10 사이의 값으로 등급 추정
 검지도: 고장모드와 원인/메커니즘을 찾아서 시정조치 능력을 평가하여 1~10 사이 값으로 추정
 RPN: 발생도×치명도×검지도, 잠재고장모드에 의한 기대위험의 예측치



(b) 화재 재현실 운영부



(a) 화재 시험실

<그림 1> 화재 재현 전용공간

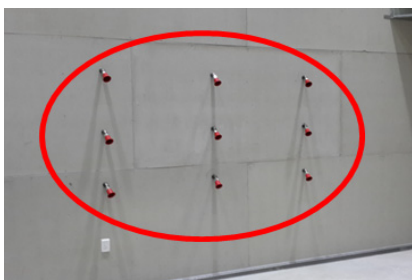
대해서는 그 규정이 명확하지 않다. 하지만 실제 제품의 내구성이 다하기 전까지 사용하는 소비자들의 특성을 살펴보면 장시간 사용으로 인해 절연성능 저하 및 오동작을 일으킬 수 있는 열화품이 가장 위험한 존재라 할 수 있다. 따라서 본 연구원에서는 장시간 사용으로 열화가 진행된 제품에 의한 고

장메커니즘을 추정하기 위해 실제 가정에서 사용되는 가전 제품들의 필드데이터를 바탕으로 <표 2>와 같이 일반적인 가전제품들의 요소별 FMEA를 추정하였다.

열화된 가전제품 요소별 FMEA 추정 결과 과전압으로 인한 절연파괴 및 보호회로 오동작 대전류로 인한 제품 발화,

<표 3> 화재 재현실 장비 구성

재현장비	장비 구성	장비 사양
과전압 인가시스템	전력 변환기 VVVF	5 000 V내의 정전압 정주파수 공급
	고압 트랜스포머	입력 전압의 20배 증가
계통 노이즈 증폭 인가시스템	전원 노이즈 증폭 시스템	계통전압의 노이즈 인가 및 증폭
	화재 재현실 분전반	과전압 및 노이즈 프로그램 제어
단락전류 인가시스템	단락전류 시스템	90 A, 60 A, 40 A 인가
	배터리 충방전 지그	50 S 동안 과전류 인가 후 충전
통합 모니터링 시스템	오실로스코프	임피던스, 전류, 전압 실시간 측정
	시험 운영 및 계측 시스템	원격 과전압 과전류 제어 시스템
영상분석 시스템	CCTV	4채널, 동영상 저장 및 재생



(a) 이산화탄소 분 사구



(b) 이산화탄소 방출



(c) 집진기 내부



(d) 집진기 외부

<그림 2> 비상 화재 진압 시스템

노이즈전원 인가로 인한 제품의 오동작 등을 공통 요소로 확인할 수 있었고, 그로인한 인체의 감전 및 대형화재로 이어질 수 있는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구원에서는 열화품에 대한 화재(제품에 인가되는 과전압 및 과전류 또는 제품의 열화로 인한 발화)재현 시험을 위한 시스템 설비를 구축하였다. 설비공간은 다음 <그림 1>과 같이 화재 및 감전 시험을 위한 운영공간과 실제 시험을 하는 시험실로 두 공간으로 나누어 구성하였다.

감전 및 화재 재현실 내부에 구성된 장비 내역은 다음<표 3>과 같다.

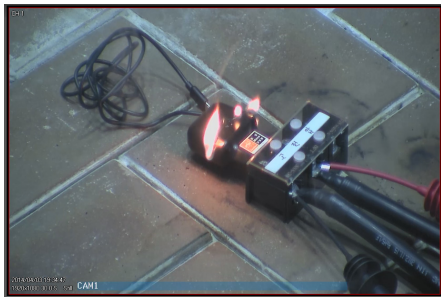
만약 실험중 화재가 커져 화재진압이 어려울 경우를 대비하여 비상 화재 진압 시스템을 설치하였다. 대형 화재시 비상기동 버튼을 두 번 눌러주면<그림 2>의 (a)의 분사구를 통해 다량의 이산화탄소 및 하론가스가 4벽면에서 <그림 2>의 (b)와 같이 동시에 방출되어 화재를 진압하도록 시스템 설계되었다. 진화가스 방출 후 화재진압이 완료되면, 안전을 위해 방출된 이산화탄소를 외부로 방출할 수 있도록 집진기 시스템을 <그림 2>의 (c)와 (d)와 같이 설계하였다.

3. 화재 및 전기적 이상 재현시험

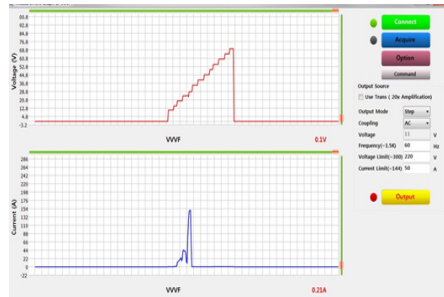
3.1 과전압 시험

일반적으로 장시간 사용한 가전제품의 경우 초기 대비 열화가 진행될수록 절연내력이 급격히 감소하는 것을 확인 할

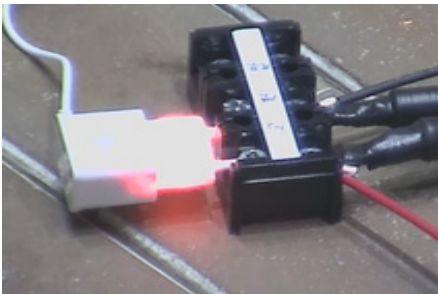
수 있다. 일반적인 소비자들의 경우 제품의 내구성이 다하여 동작불능 상태가 되지 않으면 계속해서 사용하는 특성이 있다. 하지만 초기대비 절연내력이 약해진 제품에 과전압이 인입된다면 초기제품의 절연과과전압 대비 낮은 전압에도 절연이 파괴되어 발화거나 인체의 감전을 일으킬 수 있다. 따라서 본연구원에서는 초기에 확인 할 수 없는 과전압에 대한 영향을 재현하기 위해 과전압 시스템을 설계하였다. 과전압 시험의 전압인가 방식은 크게 두 가지 모드로 분류된다. 일정하게 전압을 지속적으로 공급하는 constant 모드와 단계별로 프로그램 상에 입력한 전압을 인가하는 step 모드로 분류된다. 일반적으로 constant 모드의 경우는 시험시료의 절연이 파괴되어 화재 및 폭발이 일어나는 전압범위를 알고 있는 경우 절연 파괴 범위의 전압을 인가하여 시료의 안정성 유무를 판별하고, step 모드의 경우는 절연 파괴전압의 범위를 알지 못하는 경우 step 모드를 이용하여 절연 파괴 범위를 확인 할 수 있다. 다음 <그림 3>은 실제 과전압 재현시험을CCTV를 통하여 모니터링 분석한 것이다. <그림 3>의 (a)는 휴대폰 충전기를 step 모드를 이용하여 전압을 200 V에서 각 100 V씩 단계별로 증가시켜 약 600 V 내에서 절연이 파괴되어 화재가 발생한 시험 사진이다. <그림 3>의 (b)는 인가 된 전압 스텝과 절연이 파괴되어 과전류가 흐름으로써 어느 시점에서 절연이 파괴되었는지를 확인할 수 있는 파형을 나타내고 있다. <그림 4>의 (c)는 constant 모드를 이용하여 1500 V 전압을 인가한 화면을 나타낸 것이다. <그림 4>의 (d)와 같이 인가 즉시 충전기 절연이 파괴되어 과전류가 흐른 것을 확인할 수 있다. 따라서



(a) 과전압 step 모드시험



(b) 과전압 step 모드 시험 파형



(c) 과전압 constant 모드시험



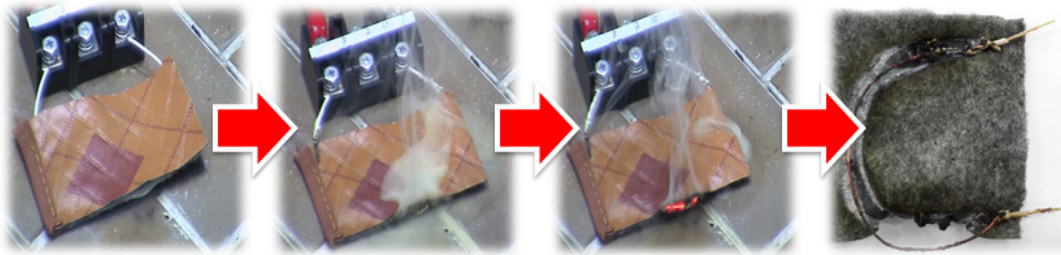
(d) 과전압 constant 모드 시험 파형

<그림 3> 과전압 시험 모니터링 분석

구축된 과전압 시스템을 사용하여 가속시험으로 인해 열화된 제품들을 사전에 미리 테스트해 볼 수 있으며, 추후 제품별 열화된 제품의 과전압 내구성 기준을 설정하여 발표할 예정이다.

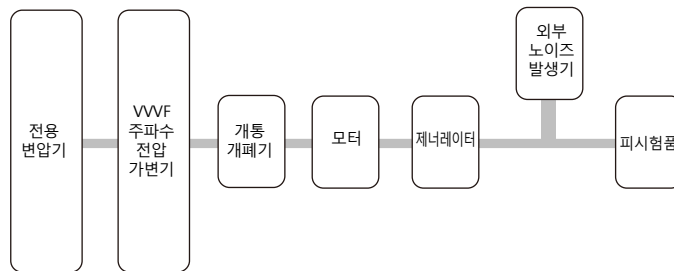
3.2 과전류 시험

가전제품 사용 중 열화 또는 우발적 사고로 인한 순간단락시 전류가 순간적으로 가전제품에 유입된다. 이러한 상황을 재현 및 메커니즘 분석을 위해 과전류 인입 시스템을 설계하였다. 설계된 과전류 시스템은 크게 3가지 모드로 나뉘어져 있다. 대전류 90 A, 중전류 60 A, 하전류 40 A로 시료와 그 상황에 맞게 전류를 흘려 과전류에 대한 영향을 확인할 수 있다. 가전제품 사용 중 열화 또는 우발적 사고로 인한 순간 단락시 전류가 순간적으로 가전제품에 유입된다. 이러한 상황을 과전류 재현시험을 통해 그에 대한 영향을 확인 분석 할 수 있다 <그림 4>는 전기매트의 열화 및 가열선과 감열선의 축열로 인해 절연이 파괴되면서 발생하는 단락시험을 재현한 것이다.



인버터 사용: Battery 18개로 Charging 후 전원계통과 분리 후 과전류 시험

<그림 4> 전기매트 과전류 시험



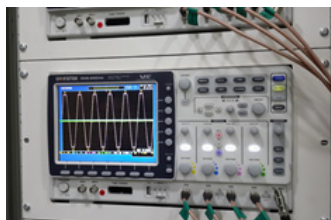
<그림 5> SMPS 정현파 및 노이즈 인가 파형

3.3 노이즈 증폭

가전제품 내의 인버터 등의 제어회로에서의 고주파 등으로 발생할 수 있는 계통 전압의 노이즈 및 증폭 재현시스템을 구축하였다. 하지만 VVVF를 이용하여 전원을 부하에 공급하고 이 전원에 노이즈 증폭기를 이용하여 전원을 공급할 경우 역으로 전원으로 노이즈가 흘러 VVVF가 전원을 차단한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 <그림 5>와 같이 VVVF를 이용하여 integration motor를 동작시키고 이 모터를 제너레이터로 사용하여 부하에 전원을 공급한다. 그리고 제너레이터로 공급되는 전원에 구축된 노이즈 시스템을 증폭시켜 인가한다면 VVVF의 노이즈로 인한 전원 차단 없이 부하에 노이즈를 증폭시킨 전원을 공급할 수 있다.

3.4 시험파형 계측 및 분석

<그림 6>은 실험 파형을 관측할 수 있는 모니터링 시스템을 나타낸 것이다. 화재나 감전을 재현하기 위한 시험은 위험



(a) 오실로스코프 파형 분석



(b) 10 m 프로브

<그림 6> 모니터링 시스템

할 수 있으므로 모니터링 시스템을 통해 안전하게 관측 할 수 있도록 설계하였다. 파형의 안전한 측정을 위해 특별히 제작한 프로브를(길이: 10 m) 사용하여 실험실 외부에서 파형 관측이 가능하도록 설계하였다.

4. 결론

일반적인 가전제품의 경우 품질인증 및 안전인증 등의 초기에 제품의 안전성 및 품질 검사를 받도록 되어있다 하지만 제품의 장시간 사용으로 인한 열화품에 대한 품질 및 안전성 평가에 대해서는 그 규정이 명확하지 않다. 실제로 제품을 사용하는 소비자의 경우 제품의 내구성이 다하여 제품의 동작 불능상태가 되기 전까지 사용하는 경향이 있어 열화품의 경우 실제 필드에서 가장 위험한 요소라 할 수 있다 이러한 장시간 사용으로 열화가 진행된 제품에 의한 고장메커니즘을 추정하기 실제 가정에서 사용되는 가전제품들의 필드데이터를 바탕으로 일반적인 가전제품의 제품 요소별 FMEA를 추정하였다. 그 결과를 바탕으로 주요 고장메커니즘을 구현할 수 있는 과전압, 과전류, 노이즈전원인가 및 측정 시스템을 구현하였다.

따라서 본 논문에서는 구현된 가전제품 화재 메커니즘 인프라 시스템을 기반으로 하여 일반적으로 가정에서 사용하고 있는 세탁기, 안정기, 전열기, 전자식 스위치, 휴대폰 충전기 등 다양한 가전제품에 대한 최대 5000 V의 단계별 전압 증가 형태의 과전압시험 일정한 과전압 인가시험 계통 전압의 노이즈 인가 및 증폭 시험, 대전류 90 A, 중전류 60 A, 하전류 40 A의 3단계 과전류 시험 등의 다양한 재현시험이 가능한 시스템에 대하여 기술하고, 이를 통한 전기화재 및 감전에 대

한 메커니즘의 원인 및 분석이 모니터링 시스템을 통한 사례를 기술하였다. 추후 구현된 인프라 시스템을 이용하여 실제 필드에서 노후화된 제품의 화재의 위험성을 줄이기 위해 신제품과 가속시험을 통해 열화된 제품간의 전기적 특성 및 변화를 비교 분석하여 화재 및 감전에 따른 새로운 시험법을 제품별로 개발할 예정이고, 이 시험법을 바탕으로 관련 제조기업의 제품안전에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 김준성 · 이창훈 · 김의준 · 형재필 · 이영주 · 임홍우 (2014) 세탁기 고장메커니즘 분석, 한국신뢰성학회 춘계 학술대회, pp. 491-500.
- [2] 송재용 · 사승훈 · 남정우 · 김진표 · 조영진 · 오부열 (2011), 전기장판 열선 결함에 의한 전기화재 원인분석 한국안전학회지, 제27권, 제2호, pp. 7-12.
- [3] 원중수 (1998), 전기화재 · 전기기기의 출화요인과 감식 한국화재소방학회논문지, 제2권, 제2호, pp. 22-25.
- [4] 원동조 (2014), 휴대폰 충전기의 화재, 감전 메커니즘 분석 및 재현시험 한국신뢰성학회 춘계학술대회, pp. 501-508.
- [5] 최충석 · 백동현 (2000), 형광등용 안정기의 화재원인 판정에 관한 연구, 한국화재 · 소방학회, 제14권, 제3호, pp. 1-5.
- [6] 이종호 · 김두현 · 김성철 (2009), 전기화재원인분류의 문제점 분석 및 개선안 제시, 한국화재 · 소방학회 논문지, 제 23권, 제1호, pp. 36-40.
- [7] 소방방재청 (2014), “2014년 화재발생현황 분석” pp. 1-17.
- [8] 소방방재청 (2013), “2013년 8월 전국 화재발생현황 분석” pp. 1-16.