

해양플랜트 전기시스템의 전기화재 분석 및 평가 기법

강규홍, 김태오 (한국조선해양기자재연구원)

1. 서론

해양플랜트는 폭발·화재등 사고에 대한 일관된 지휘체계를 갖는 대응이 힘들고, 사고 발생 시 규모나 확산 속도가 다른 시설에 비해 크고 빠르기 때문에, 설계 단계에서부터 사고에 대한 위험도 기반 설계 및 예방 대책 수립을 요구하고 있다. 특히, 해양플랜트 Topside에서 발생하는 폭발·화재 사고는 누출 가스와 전기설비의 전기적 점화원의 결합에 의해 사고가 발생한다[1].

그러나 해양플랜트 Topside 전기설비의 경우 측정당시의 상황으로 상태가 항상 유지되는 것이 아니며, 폭발·화재 사고의 점화원으로 작용하는 ARC, Spark는 또 다른 점화원인 전력기기의 열화(Heating)와는 달리 매우 순간적인 현상이고 또한 대부분이 비 누출식으로 가스 누출 감지 센서나 온도 센서와 같은 방법으로는 폭발·화재 사고의 제어가 불가능하다. 또한, 누출된 전기설비라고 할지라도 고장이나 열화에 의해 발생하는 현상이 절연저항이나 누설전류 측정등의 일반적인 방법외에는 대부분 검출하기 어렵기 때문에 해양플랜트 전기설비의 ARC, Spark 및 Heating을 유발하는 전력기기의 고장 및 진단, 감지에 대한 기술개발이 매우 절실하다[2,3].

해양플랜트의 경우 정기검사를 통해 전력기기 및 전기설비의 안전 상태를 확인하고 있다. 그러나 전력기기 및 전기설비의 경우, 점검 당시의 조건이 부하설비를 포함한 모든 전기설비의 상태를 완전히 보여주지 못하고, 사고의 징후가 다른 설비에 비해 비가시적이기 때문에 재해가 발생될 때까지 인지하지 못하는 경우가 대부분이다. 따라서 부하사용 조건에 따라 수시로 변화하는 상황에 대응 가능한 상시 감시체계의 확보가 반드시 요구된다.

전기설비에 대한 보호설비는 누설전류와 과전류 등으로 한정되어 있으나, 화재발생 메커니즘은 단락, 누설전류, 접촉불량 등의 아크고장에 의해 시작되는 것이 대부분이므로 기존의 보호설비에 아크고장에 대한 보호체계를 포함시켜야 할 필요성이 있다. 누설전류, 아크고장, 과전류 등에 의해 발생하는 신호들은 전기화재를 예방하는데 유용한 징후를 보여주나, 이에 대해서 일괄 분석할 수 있는 시스템이 구성되지 않고 있다 [3]. 또한 기존 기술들은 설치 환경이 네트워크화 되어있지 않아서 전기설비를 위한 통합관리시스템으로의 활용도가 낮다.

따라서 이들 신호들의 종합적 수집과 분석 원격 감시 등을 위한 시스템 개발이 요구된다. 특히, 전기설비의 고장이나 열화에 의해 발생하는 신호를 검출하여도 직관적으로 판단할 수 있는 형식을 갖추고 있지 않은 경우가 많고, 주변 환경에 영향을 많이 받기 때문에 잡음과의 식별을 위한 알고리즘 적용이 필요하다[4]. 이를 통하여 설비와 재난 발생 사이의 상관관계를 분석할 수 있는 기술이 적용된 전기화재 감시 시스템의 개발이 요구된다.

해양플랜트에서의 전기안전감시시스템은 전력감시 및 전력 자동제어시스템에서 부분적으로 기술들이 적용되고 있으나, 일반적으로 과전압, 과전류, 고조파 등의 측정에 의한 정전 사고 예방에 주력하고 있으며, 측정기술로는 아날로그 측정값의 디지털화 기법에 의한 데이터 취득 및 측정기술 등을 활용하며, 온도, 전압, 전류 등 여러 가지 측정 데이터에 대한 PC와의 연계 가능 정도를 수행한다.

따라서, 본 논문에서는 해양플랜트 전기시스템의 전기화재 분석 및 평가 기법 개발을 수행하였다. 먼저 FPSO 전력기기의 전기화재 분석은 호주 지역의 해양플랜트 사고분석 보고서인 NOPSA (National Offshore Petroleum Safety Authority) 자료로부터 전기화재 통계분석으로부터 FPSO 전력기기의 전기화재 원인 분석을 수행하였다. 또한, 전기설비의 ARC, Spark 및 Heating을 유발하는 전력기기의 내구수명에 따른 고장, 열 충격과 기계적 충격에 의한 고장 및 고조파 전원의 인가에 의한 고장특성을 초고속 수명시험(Highly Accelerated Life Test : HALT)기로부터 내구 수명특성을 구현하여 전기화재 평가 기법을 제시하였다.

2. 해양플랜트 전기설비의 전기화재 통계 분석

표 1. 전기화재 발화형태별 현황

	계	전기화재 발생 프로세스 정립									
		단락(합선)	기기과열/고장	과부하	누전	접촉불량	트래킹	반단선	낙뢰	정전기	기타
조사건수	8,005	4,985	1,304	755	391	378	79	36	29	28	20
점유율(%)	100	62.3	16.3	9.4	4.9	4.7	1.0	0.4	0.4	0.3	0.3

*출처 : 중대산업사고 사례집, 1999(한국산업안전공단)

해양플랜트의 전기화재 사고통계를 분석하기 전에 육상에서의 일반적인 전기화재의 발화 형태별 현황을 표 1에 나타내었다. 전기화재의 주요발화로서 단락(합선)이 가장 높은 점유율을 차지하며, 기기과열/고장, 과부하, 누전 순으로 발화가 된다. 이러한 발화형태 분석을 통해 전기화재 발생 프로세스를 정립할 수 있다.

국내에서 해양플랜트를 운영하고 있지 않기 때문에 사고관련 데이터를 확보하고 있지 않고, 관련 데이터 입수가 어렵기 때문에 해양플랜트와 유사한 국내 석유화학 플랜트의 사고현황 데이터를 활용하였다. 국내 석유화학 플랜트의 사고분포 특성을 그림 1에 나타내었다. 국내 사고현황을 분석해 보면 점화 원 으로는 전기기기, 노내화염, 뜨거운 표면, 고온, 마찰스파크, 그라인딩 및 충격, 정전기, 용접, 번개, 성냥, 자연발화 등이 조사되었다. 특히 노내화염이나, 엔진, 뜨거운 표면, 스파크 등이 주요 점화 원 으로 조사되었다[1,2].

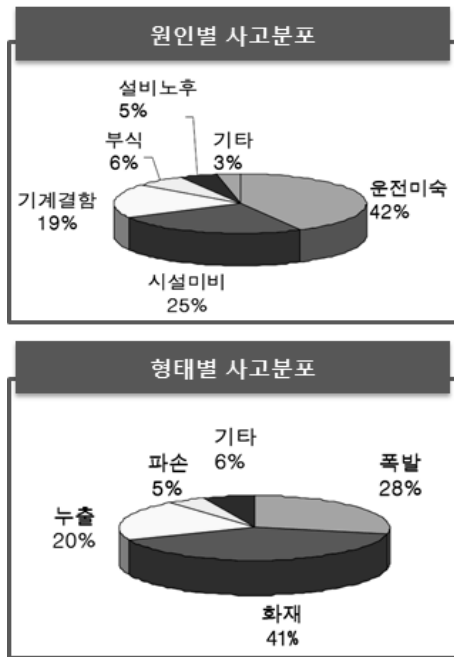


그림 1. 국내 석유화학 플랜트 사고분포

해양플랜트 전기화재 분석을 위하여 해양플랜트의 NOPSA(National Offshore Petroleum Safety Authority)의 전기화재 통계 데이터를 분석하고 분석결과를 통하여 FPSO 전력기기 전기화재 원인 분석을 수행한다[1].

전 세계적으로 현재 운용중인 FPSO 분포를 보면 15대가 운용되고 있으며 전체 해양플랜트 설비 중 7%를 차지하고 있다(2011년 기준). 전 세계 FPSO설치 및 운용 현황을 그림 2에 나타내었다.

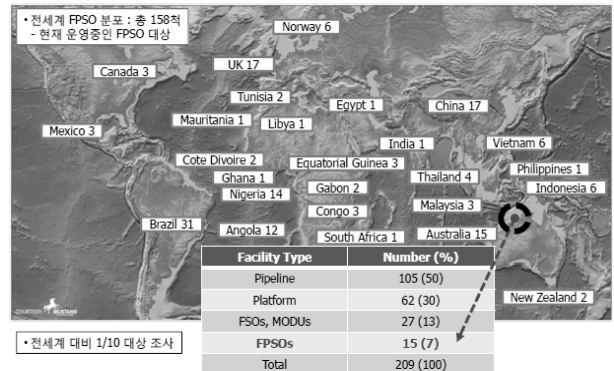


그림 2. 전 세계 FPSO 설치 및 운용 현황

*출처 : Mustang Engineering, Offshore Health & Safety Performance Report

호주해역에서의 해양플랜트 전기사고 현황을 그림 3에 나타내었다. 2005년~2008년 전체사고 건수(1050건)중 전기관련 사고(42건)는 4% 정도를 차지하고 있으며, FPSO 에서 10건 정도가 발생하였다. 전기사고 결과로는 고장 9건, 화재 5건, 쇼크 25건, complaint 3건으로 조사되었다.

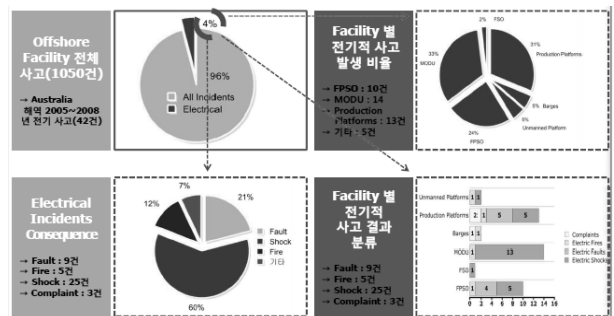


그림 3. 해양플랜트 전기사고 현황(호주)

*출처 : Analysis of Reported Electrical Incidents & Complaints 2005~2008 (NOPSA Report)

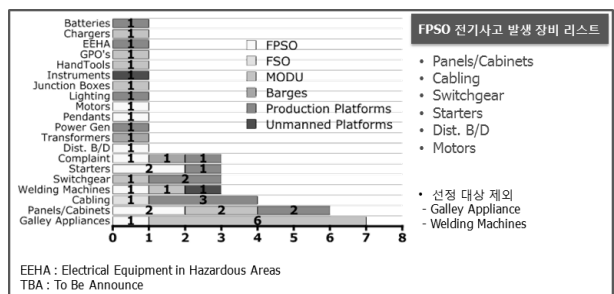


그림 4. 해양플랜트 유형별 전기적 사고(NOPSA)

해양플랜트 설비 종류별 전기기기에 의한 전기적 사고를 그림 4에 나타내었다. 특히 FPSO에서의 전기사고 발생 기기

들을 살펴보면 Panel/Cabinets, 케이블, 스위치기어, 스타터, 배전반, 전동기 등이다.

Electrical Incidents (4)	분석 대상기기 (6)					
	Panels /Cabinets	Cabling	Switchgear	Starter	Dis. B/D	Motors
Wateringress /Earthing	√	√	√	√	√	
Defective Insulation		√	√	√	√	√
Overload		√	√	√	√	√
Competence						

그림 5. FPSO 전기설비의 전기사고 분류

그림 5에서는 FPSO 전기사고 발생 기기들을 전기사고인 Watering/Earthing, 절연불량, 과부하, 미숙련 작업자 등으로 분류하였다.

3. 해양플랜트 전력기기의 Electrical Source에 의한 화재분석

해양플랜트 전력기기의 전기적 점화원에 의한 화재분석을 위해 전기화재 발생 프로세스를 분석하고, 전력기기의 전기적 점화 원 분석을 위한 실험적 접근 방법에 대해 분석하였다.

3.1 전기화재 프로세스 분석

해양플랜트 전력기기 및 전기설비의 단계적 전기적 화재 발생 요인을 그림 6에 나타내었다. 전력기기 및 전기설비의 주요 화재요인으로는 전기적 쇼크, 버닝, 과열에 의한 방전, 단락, 절연열화, 과부하, 통전손상, 동작불능, 절연파괴 등이 있고, 이러한 원인은 고압측 누설방전, 코일간 층간 단락 및 과부하 통전등의 다양한 원인으로부터 발생되어짐을 알 수 있다[3,4].

전력기기의 열화 원인 및 현상은 그림 7에 나타내었다. 전력기기 및 전기설비의 장기 사용에 따른 마모 및 기기열화에 의한 사고, 접점 및 각 연결 부위의 접촉 불량에 의한 방전, 과열현상, Surge, 고장전류 등에 의한 순간단락으로 인한 사고 등을 생각할 수 있다.

전기설비의 열화 요인으로는 전기적, 열적, 기계적 스트레스 및 환경적 요인의 영향을 복합적으로 받아 화학적 또는 물리적 성질의 변화가 생기는 것을 의미하며 특히 위 요인들 중에서 전기적 요인에 의한 열화에 따른 고장이 가장 많이 발생한다.

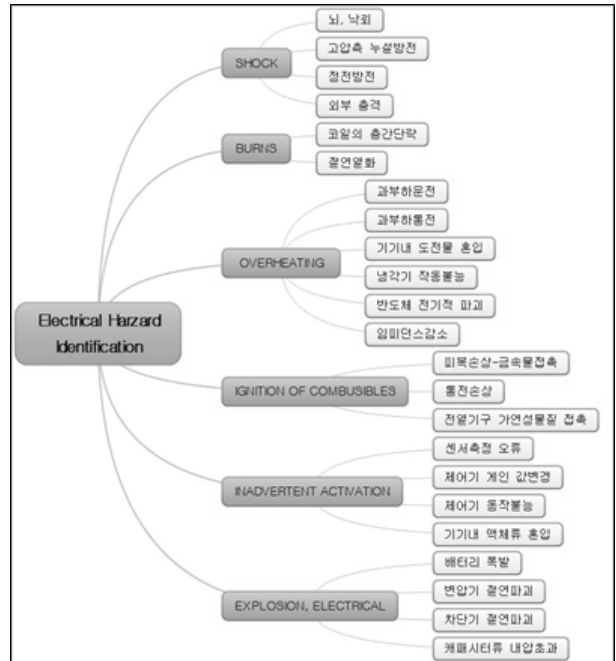


그림 6. 전기설비 화재 요인 리스트

열화현상은 열에너지로 인하여 물질 내부 분자 레벨의 구조가 불가역적인 화학적 또는 물리적 변화를 일으켜 특성이 저하하는 현상으로, 접점부의 소모와 고무재 패킹 부위의 열화가 해당된다.

전기적 열화현상을 분석해보면 전계 및 전계의 집중으로부터 재료가 열화하는 현상으로, 일반적으로 절연물의 과도현상 특성으로 표시된다.

기계적 열화는 기계적 스트레스로부터 재료가 경시적으로 변형하거나 응력 집중으로부터 국부적인 결함이 진전되는 현상이다. 재료적 측면에서 보면 크리프(creep)와 피로가 있고 부품의 상호작용 측면에서 보면 마모와 이완 등이 있다.

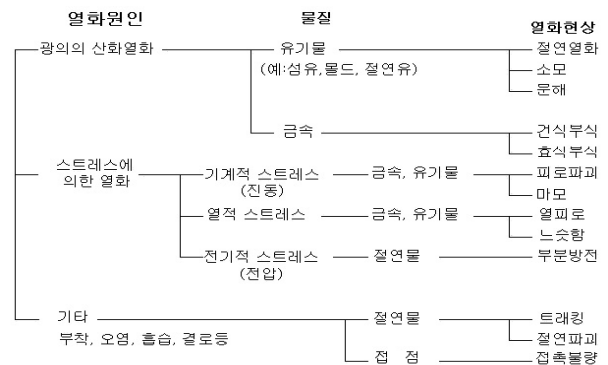


그림 7. 기기열화 원인 및 현상

3.2 전력기기 화재 Electrical Source 실험적 접근

전력기기의 화재발생에 대한 전기적 점화원 분석을 위한 실험적 접근법으로 기기열화 원인 및 현상 분석을 통해 기계적 스트레스(진동), 열적 스트레스, 전기적 스트레스(전압) 인가에 의한 열화발생 현상 실험을 수행할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 전력기기의 장기 사용에 따른 마모 및 기기열화에 의한 사고, 접점 및 각 연결 부위의 접촉 불량에 의한 방전, 과열현상, Surge, 고장전류 등에 의한 순간단락으로 인한 사고 등을 구현하기 위하여 사용 전력기기의 노화 및 내구 수명 저하를 위한 열적 기계적 충격 구현 시험 기법을 제시하였다. 일반적인 신뢰성 육조곡선을 그림 8에 나타내었다.

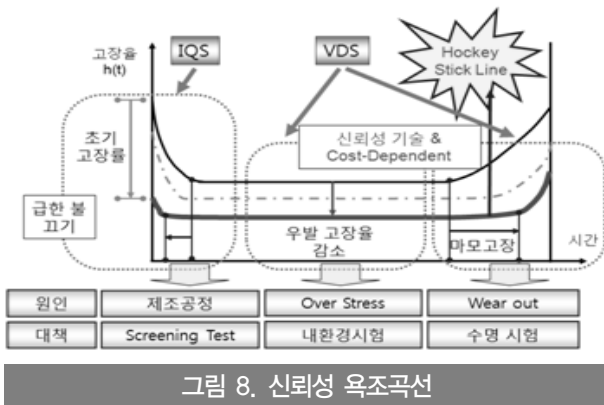
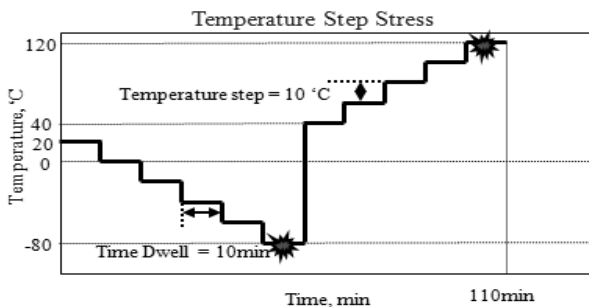
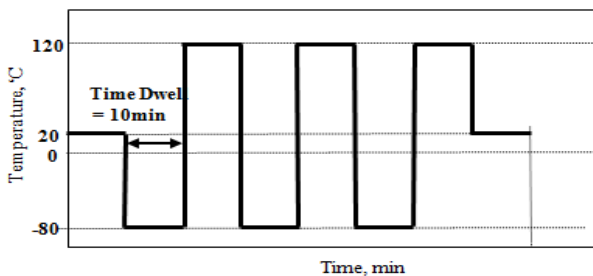


그림 8. 신뢰성 육조곡선



(a) 온도 계단형 스트레스 시험기법



(b) 급격한 온도 변화 시험기법

그림 9. 열 충격 시험기법

해양플랜트 폭발·화재에서 전력기기의 전기적 점화 원은 대부분이 우발 고장과 마모고장이므로 내구 수명 시험이 요구되어진다. 본 논문에서 구현하고자하는 시험 기법은 신뢰성 시험기법이 아닌 해양플랜트 폭발·화재에 있어서의 전력기기의 충격에 의한 노화 및 열화 기저재 구현에 있다. 따라서 전력기기의 열 충격 인가 기법을 그림 9에 나타내었다. 그림 9(a)는 Cold Step과 Hot Step으로 구분하여 Cold Step과 Hot Step의 온도 계단형 스트레스 인가를 하며, 온도 계단형 스트레스 시험에서 확인된 동작한계에서 추가로 급격한 온도 변화 시험을 병행하여 전력기기의 열 충격 시험을 하는 기법이다.

기계적 스트레스로 진동 충격에 의한 고장 현상을 구현하기 위한 시험 프로세스는 그림 10에, 열 충격과 기계적 진동 충격을 동시에 인가하는 복합 충격 시험기법을 그림 11에 나타내었다.

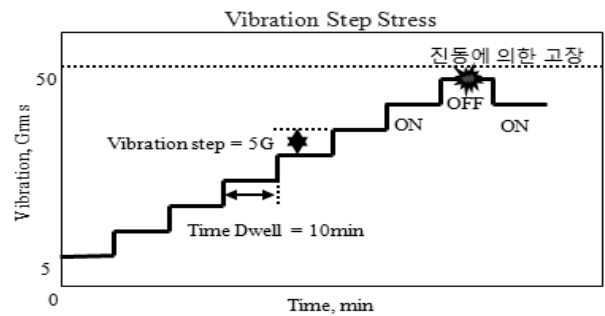


그림 10. 진동 충격 시험기법

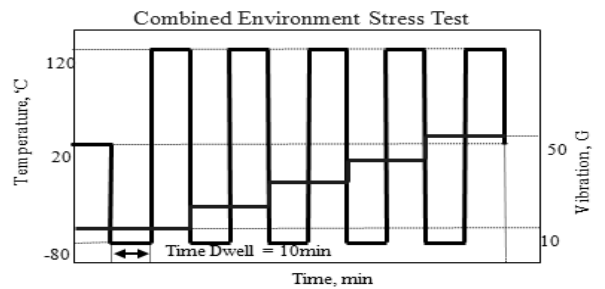


그림 11. 열-진동 복합 충격 시험기법

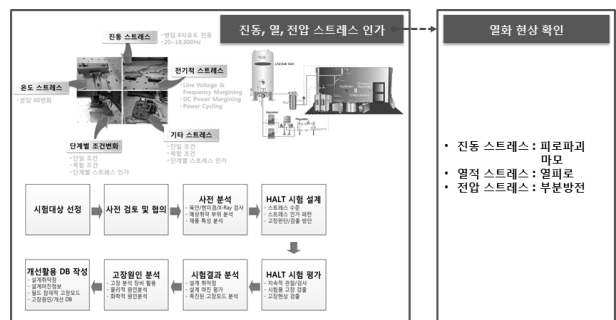


그림 12. 열-기계-전기적 스트레스에 의한 열화발생

열 충격과 기계적 충격 및 복합 충격 시험을 통하여 해양플랜트 전력기기의 노화 현상을 구현한 후 고조파 성분을 포함한 다양한 형태의 전원과 고전압 인가시의 ARC, Spark 특성 시험을 수행하여 전력기기의 열화 발생 빈도를 실험적인 방법으로 산정한다. 이와 같은 열-기계-전기적 스트레스에 의한 전력기기의 열화 발생 프로세스를 그림 12에 나타내었다.

4. 전기화재 진단평가 및 시험지원 기반

최근 선박 및 해양플랜트에서 지속적으로 사고가 발생하고 있으며, 선박의 노령화 및 그린 쉽, 전기추진선박 및 FPSO 등에서 고압 배전체계와 대용량 부하의 사용 증가에 따라 전기설비를 통한 전기적 쇼크, 고장, 전기 화재 등의 사고가 빈번하게 발생하고 있는 추세이다. 최근 5년간의 화재·폭발 사고 건수를 표 2에 나타내었다.

* 온실가스 감축기술, 에너지 이용 효율화 기술, 청정에너지 기술, 친환경 기술이 적용된 선박

표 2. 최근 5년간 화재·폭발 사고 건수

연도	2007	2008	2009	2010	2011	총계
건수	37	25	34	25	57	178

*출처 : 해양심판관

선박 및 해양플랜트에서 고장전류 차단실패로 인한 배전반 폭발사고 및 전기설비의 손상은 화재·폭발사고로 이어질 수 있으며, 화재예방 및 피해를 최소화하기 위하여 전기설비에 대한 안전성 진단 및 시험평가의 중요성이 대두되고 있다.

해양플랜트의 경우 Topside 전장설비의 심해 설치 증가로 고압 환경에의 전기설비에 대한 화재·폭발 관련 시험평가 및 진단의 중요성이 증가하고 있다.

국내의 전기설비에 대한 설계, 감리, 시공 및 안전관리 기술은 선진국 수준에 근접하였으나 대부분 육상에 국한되어 있으며, 선박 및 해양플랜트 전기화재에 대한 체계적인 분석 및 시험평가 기술은 부족한 실정이다.

전기화재 관련 국내외 시험기관 현황과 규제 및 시험표준을 표3과 표 4에 나타내었다. 국내의 시험수요 및 인증기관 현황에 대해 살펴보면 다음과 같다. 국내 전기화재 관련 기관으로는 전기안전연구원, 국립과학수사연구소 등에서 전기화재 관련 시험분석·연구 등을 수행하고 있으나, 조선·해양 전기설비 기자재의 전기화재에 대한 전문적인 진단평가 및 시험평

가 서비스가 부족할 실정으로, 특히 그린 쉽, 전기추진선박 및 해양플랜트 전기설비 기자재의 경우 선주측의 옵션 행사 및 전기안전에 대한 다양한 검증자료(전기화재 안전성 평가 및 진단 데이터) 요구로 국산화율 제고에 어려움을 겪고 있다.

최근 그린 쉽, 전기추진선박 및 해양플랜트 수요가 증가함에 따라, 정부 및 조선사, 관련 기자재 업체를 중심으로 기술 개발을 활발히 진행하고 있으며, 전기설비의 안전과 관련된 시험수요가 최소 30% 이상 될 것으로 예상된다.

표 3. 전기화재 관련 국내외 시험기관 현황

	국내		국외	
	전기안전연구원	전기화재, 감전, 전기설비 사고등의 연구전문기관	HSE	영국화재시험연구원
국립과학수사연구소	화재사고조사 및 감식			
한국전기전자시험연구원	전기용품 안전인증-정격 10kW 이하 소형기기 시험			

표 4. 규제 및 시험표준

	규제	시험표준
한국	산업안전보건 및 전기용품안전인증	KS C IEC 60079 Series
유럽	Explosion protection directive 94/9/EC	EN 60079 Series
국제	IMO 등	IEC 61165-450 NFPA 70E IEEE 1584

5. 결론

본 논문에서는 전기화재 통계분석을 통하여 FPSO 전력기기 전기화재 원인을 분석하기 위한 방법으로 전기적 점화원에 의한 화재 프로세스를 분석하였다.

또한 전력기기 화재의 전기적 점화원 분석을 위한 실험적 접근법을 통하여 향후, 해양플랜트 전력기기의 화재 점화원 구현을 위한 시험방법의 구현 및 전기기기 설계에 적용하고자 한다.

참고 문헌

[1] Mustang Engineering [Offshore Health & Safety

Performance Report] (2009)
[2] Hal Obaidi [Analysis of Reported Electrical Incidents & Complaints] (2009)

[3] 한국산업안전공단 [중대산업사고 사례집] (1999)
[4] 김진표, 김만건 [전기화재감식공학] (2006)



강 규 홍

- 1967년생
- 2001년 창원대학교 전기공학과 졸업 공학박사
- 현 재 : 한국조선해양기자재연구원 그린전력 IT연구센터 센터장
- 관심분야 : 해양플랜트 전력시스템, HILS 기반 조선해양 시스템 엔지니어링, 전기 추진선박
- 연 락 처 : ** - ** - **
- E - mail : kang@komeri.re.kr



김 태 오

- 1975년생
- 2009년 울산대학교 전기전자과 졸업 공학박사
- 현 재 : 한국조선해양기자재연구원 그린전력 IT연구센터 팀장
- 관심분야 : 조선해양 시스템 제어, 에너지저장시스템
- 연 락 처 : ** - ** - **
- E - mail : tokim@komeri.re.kr

PRADS 2013

(The 12th International Symposium on Practical Design
of Ships and Other Floating Structures)

Date : 2013. 10. 20 ~ 25

Place : Changwon KOREA

<http://www.prads2013.org>