비금속제 소형선박의 낙뢰사고 방지를 위한 연구

Study on Protection System against Lightning to Strike to a Small Non-metal Craft

이석희†*, 유영종*, 권수연*, 박창선**
Seok-Hee Lee†*, Young-Jong Yoo*, Soo-Yeon Kwon*, Chang-Sun Park**

요 약 문

자연 현상중의 하나인 낙뢰는 대기중에서 일어나는 뇌운과 보호대상 물체간의 방전현상으로 그 발생 빈도와 피해를 예측할 수 없으며, 국내에서 선박이 낙뢰로 인한 피해가 보고된 경우는 거의 없는 실정이지만 매년 정보화 통신장비 등의 보급확대와 더불어 낙뢰에 의한 피해가 증가할 것으로 판단되며 국내 대부분의 소형선박들은 낙뢰에 취약한 비금속 재질인 FRP선 또는 목선으로 건조되어 있어 낙뢰에 의한 사고에 취약한 현실이다. 본 연구는 근래에 무선설비 항해용구 등의 선박에 초소형의 집적회로를 사용하는 전자장비의 보급이 증대됨에 따라 낙뢰가 선박에 입사하였더라도 부적절한 피뢰설비 때문에 과도전압이 발생하여 제어 · 감시설비 등을 파손시키는 직 · 간접적인 피해를 감소시키기 위해서 비금속제 소형 선박에 적합한 피뢰시스템을 제시하여 낙뢰에 의한 피해의 최소화를 위한 대책 마련을 목적으로 수행하였다. KS, ISO, NFPA 및 각 국의 피뢰설비기준에서는 비금속제 선박의 피뢰설비 규정을 제시하고 있으나 국내 규정에서는 비금속제 소형선박에 관한 피뢰설비의 설치기준이 마련되어 있지 않은 실정이므로 이번 연구결과를 통해서 비금속제 소형 선박의 피뢰설비에 대한 합리적인 피뢰설비 설치기준을 설정하는 자료로 활용할 수 있을 것이다.

※ Keywords : 낙뢰, 비금속제선박, 피뢰설비, 등전위본딩

* 선박안전기술공단 기술연구팀
** 선박안전기술공단 강원지부
† 논문 주저자

1. 서 론

자연 현상중의 하나인 낙뢰는 대기중에서 뇌운과 대지사이에 발생하는 일어나는 방전현상으로 최근 세계적인 기상이변과 더불어 그 발생 빈도 및 그 영향력을 예측하기가 어려운 실정이다. 낙뢰의 직접적인 영향은 인명사고나 화재와 같이 확연하게 나타나는 것이 있지만, 컴퓨터, 통신제어 기기와 같은 첨단 정보화 기기의 사용이 증가하고 정밀도가 급격히 신장함에 따라 낙뢰의 간접적인 영향에 의하여 발생되는 사고와 고장의 범위도 상대적으로 증가할 것으로 판단된다. 선박과 관련해서 국내에서 공식적으로 낙뢰에 의한 피해사례가 집계되지는 않았지만 Table 1에서 보는 바와 같이 보도자료 등에서 낙뢰에 의한 피해가 발생되고 있는 것으로 조사되었다. 국내 대부분의 선박들은 낙뢰에 취약한 비금속제 재질인 유리섬유강화플라스틱(이하 FRP) 및 나무로 만들어져 있고, 2009년 7월 기준 국적선 총 83,045 중 비금속제 재질의 선박이 77,647척(93.5%)이였으며, 10톤 미만의 비교적 소형인 선박은 총 75,366척 중 74,831척(99.2%)이 비금속제 재질로 되어 있어 국내 소형선박의 경우 낙뢰피해에 취약한 현실이다. 현재 비금속제 선박 관련 국내규정에는 한국선급의 고속경구조선규칙 및 고속기준을 적용받는 비금속제 선박에만 피뢰설비를 설치하도록 명기되어 있을 뿐이다. 따라서 피뢰설비의 설치가 의무화되지 않은 고속선외의 비금속제 소형선박은 낙뢰피해에 무방비로 노출되어 있는 실정으로 선박의 안전을 위해 피뢰설비를 설치할 필요성이 대두되고 있다.

특히 선박에서도 초소형의 집적회로를 사용하는 전자장비의 보급이 증대됨에 따라 낙뢰가 피뢰침에 입사하였더라도 부적절하게 피뢰설비가 되어 있으면 과도전압이 발생하여 제어 · 감시설비 등을 파손시키는 직 · 간접적인 피해는 증가할 것으로 예상되므로 이를 통계적 · 체계적으로 분석, 검토하여 피해의 최소화를 위한 대책의 마련이 요구되는 시기임이 틀림없다. 따라서 본 연구의 수행은 비금속제 소형 선박에서 낙뢰에 의한 인적 · 물적 피해를 저감시켜 보다 안전한 선박 운영환경을 구현함과 아울러 해양사고 저감 및 고객의 안전 확보를 위한 기술 등 고객의 현장애로사항에 대한 기술개발 및 보급을 위해 꼭 필요하다고 할 수 있다.

Table 1 국내 선박의 낙뢰 피해 사례

사고년도	선질	총톤수	사고지역	사고내용
2006	FRP	39	제주	항해장비
2006	FRP	7.93	목포	통신장비
2007	FRP	2.80	삼척	항해장비
2007	FRP	3.75	제주	위성항법장치
2007	FRP	34	군산	전자장비

2. 낙뢰의 이론적 현상 및 선박의 낙뢰

2.1 낙뢰의 이론적 현상

뇌방전이 발생하는 원인은 대부분 뇌운이지만 그 이외에도 눈보라, 모래폭풍, 화산의 폭발 등이 원인이 되는 수도 있다. 하층의 공기가 습도는 높으며 가벼운 공기가 있고, 상층부에 건조한 저온의 공기나 무거운 공기가 존재할 때 하층부의 대기와 상층의 대기가 불안정한 층을 형성하게 되어 이 불안정도를 해소하기 위해 강한 상승기류가 발생한다. 상승기류에 동반하여 단열팽창된 공기는 온도가 저하되고, 함유된 수증기의 응결

및 결빙이 일어나기 때문에 다량의 잠열이 방출된다. 뇌운은 대단히 높은 습도의 따뜻한 공기가 매우 높은 지표고의 상공으로 운반되는 과정동안에 생성된다.

뇌운의 종류로는 열뢰, 계뢰, 지형뢰가 있으며 발생되는 조건에 따라 구분된다. 열뢰는 지표면이 강한 햇빛으로 데워져 대기 하층의 기온 감률이 100미터에 대해 섭씨 1도 이상 커지며, 격렬한 상승기류에 의해서 발생되는 뇌운이다. 여름철 오후에 육지, 특히 산간에서 가장 많이 발생하는데, 이 경우 상공에 차가운 공기가 들어오면 대기 상태가 한층 불안정해지며 강한 열뢰가 된다. 계뢰는 한랭전선이 발달한 곳에서 적란운에 의해서 발생된다. 드물게 온난전선의 전선면을 따라 상승하는 따뜻한 공기가 불안정해질 때 계뢰가 발생하는 경우도 있다. 일반적으로 전선 가까이에서 발생하는 뇌운을 말하는데, 이러한 경우 지표면이 가열되어 있으면 대기의 상태가 한층 불안정해져서 대규모 낙뢰가 발생한다. 이를 계뢰라고 한다. 지형뢰는 기류가 지형상 높은 곳(높은 건축물이나 산 등)과 충돌한 후 상승기류가 발생하여 뇌운이 발생된다.

뇌운 내의 전하분포는 상층부는 정(+)으로 대전하고 하층부는 부(−)로 대전되며, 뇌운 하층에 일부는 정(+)의 포켓전하가 있는 경우가 많다. 뇌운의 작은 구름으로부터 수평거리가 20 킬로미터가 넘는 것까지 그 크기가 다양하며, 전형적인 뇌운의 높이는 대개 8~12 킬로미터 정도이고 바람, 물, 얼음 등이 혼재되어 있다. 정전하는 뇌운의 상부에 넓게 분산되어 분포하며, 부전하는 뇌운 중에서 기둥모양으로 분포한다. 뇌운의 주된 전하 구조는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 전기쌍극자 구조로 이의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 뇌운의 특성

항 목	하절기 뇌운	동절기 뇌운
뇌운의 높이 (km)	1.2	0.3
전하량 (C)	0.2~20	0.1~3 10^3
전 압 (MV)	약 10^2	약 10~10^2
정전에너지 (kJ)	약 10^6	약 10^2~10^8

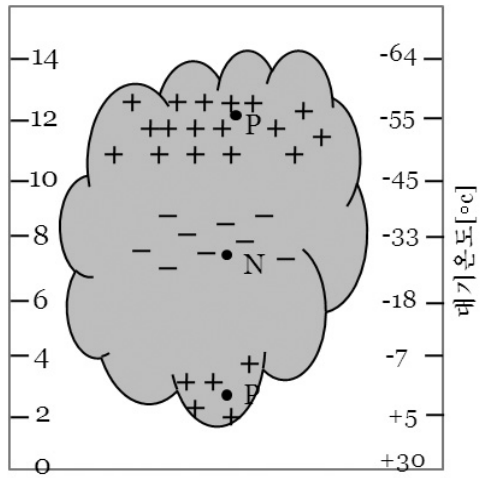

Fig. 1 뇌운의 구조

뇌운에 의해서 형성되는 주위의 전장의 세기가 대기의 절연파괴강도를 넘어서게 되면 전기적 방전이 일어나게 되며, 이를 뇌방전(Lightning discharges)이라 한다. 즉, 뇌방전현상은 대기 중에서 일어나는 과도적인 고전압과 대전류를 수반하는 전기방전으로 여러 가지 형태로 나타나게 된다.

뇌방전의 종류에는 방전되는 대상에 따라 다음과 같이 분류된다.

- ○ 뇌운에서 대지로 전하를 방출하는 낙뢰 (Cloud-to-ground lightning discharges)
- ○ 뇌운 내부에서 방전이 일어나는 운내방전 (Intracloud lightning discharges)
- ○ 뇌운과 뇌운사이에서 일어나는 운간방전 (Intercloud lightning discharges)

○ 뇌운과 주위 대기사이에서 일어나는 대기방전 (Cloud-to-air lightning discharges)

뇌방전 현상 중에서 가장 빈번하게 발생하는 방전 형태는 운간방전이지만, 여러 가지 형태의 뇌방전 현상중에서 사람과 가축의 생명 또는 시설물에 직접적으로 영향을 미치는 요인이 되는 뇌방전의 진전기구와 특성에 대해서 가장 많이 연구된 분야는 뇌운과 대지간의 방전 즉, 낙뢰현상이다.

낙뢰의 선구방전(Predischarge)인 리더는 부극성 전하로 이루어진 뇌운의 하단에서 직경 2~30미터의 뇌운전하로 충만된 원주형의 도전통로와 직경 약 1센티미터의 가늘고 강하게 이온화된 플라즈마핵이 간헐적으로 초속 300킬로미터의 속도로 대지를 향하여 진전한다. 이러한 리더는 수십 미터의 계단상으로 진전하며, 간헐적 단계 사이의 휴지시간은 수십 μs정도이다.

리더가 수뢰부로부터 수십 미터정도의 거리에 도달하면 수뢰부 끝단의 전장의 세기가 높아지며, 이것이 공기의 절연내력을 넘어서면 귀환뇌격이 리더를 향하여 진전하여 리더와 부착되어 리더는 대지에 접속된다. 귀환뇌격의 진전속도는 광속의 약 1/3정도이다.

뇌서지의 주요 발생 원인은 보호하고자 하는 설비에 직접 낙뢰가 입사하는 직격뢰와 뇌방전이 보호하고자 하는 설비 이외에 다른 장소에서 발생하는 유도뢰이다. 유도뢰는 다시 정전 유도뢰와 전자 유도뢰로 분류되며, 전자기기를 위협하는 가장 대표적인 뇌서지 발생원으로 작용한다.

선박내의 전자기기에서 가장 주의해야 할 뇌서지는 바로 유도뢰이다. 일반적으로 뇌격전류의 진행경로 주변의 전기기기나 전자장비 등은 유도서지 전압에 의해 손상을 입게 되며, 화재 발생의 위험성도 매우 높다. 유도뢰는 선체로부터 멀리 떨어진 곳에서 발생하는 뇌방전에 의해서 유도된 서지 전압이 전자장비로 침입하는 경우로서 낙뢰에 비해 뇌서지 에너지는 적은 편이나 발생빈도는 매우 높아 전자기기에 피해를 입히는 뇌서지의 대부분을 차지하고 있다.

낙뢰가 선박의 마스트에 직접 떨어지거나 근거리에서 발생하는 운내방전 또는 운간방전에 의한 전자유도작용 또는 정전유도작용으로 발생한 유도서지가 침입하는 형태로 나타난다.

2.2 선박의 낙뢰

선박의 마스트는 보편적으로 선박에서 가장 높은 위치에서 코로나를 발생시킨다. 육지와는 다르게 주변에 높은 산이나 건축물이 없기 때문에 선박의 근접한 위치에서 낙뢰가 발생한다면 이 마스트를 향하여 낙뢰가 유입될 가능성이 높아진다. Fig. 2와 같이 마스트 끝점에서 높이가 30~100야드 정도로 접근하게 될 때, 마스트 끝점에서는 정극성이 충전된다.

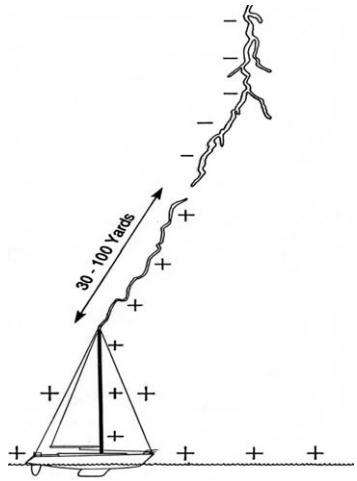

Fig. 2 선박으로의 일반적인 낙뢰

이와 같이 마스트의 끝부분에서 정극성이 나오게 되면 부극성의 낙뢰가 마스트로 향하게 된다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 선박에 접지가 되어 있다면 낙뢰가 마스트로 유도되어 마스트에서부터 물까지 연속적으로 전도됨으로써 물에서 방사되어 진다. 하지만 접지를 취하였다고 했어도 주의해야 할 점은 낙뢰 접지 도체의 2미터 이내에 있는 모든 금속 물체까지 사이드플래시가 발생하려는 경향이 강력해진다. 때문에 본딩을 반드시 설치하여야 한다.

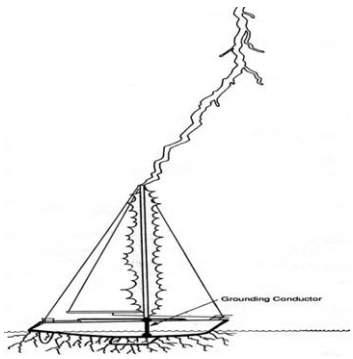

Fig. 3 접지가되어 있는 선체

반대로 Fig. 4와 같이 접지가 되어 있지 않다면, 처음에 마스트 끝부분에서 정극성이 발생하여 마스트로 낙뢰가 유입하는 것까지는 같지만 그 후 방전되는 방법이 다르게 된다.

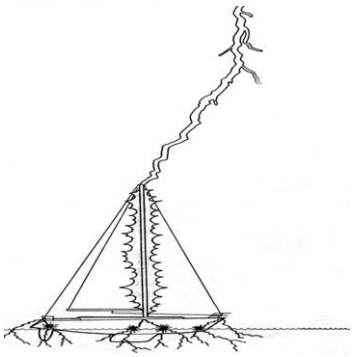

Fig. 4 접지가 되어있지 않은 선체

앞에서 말한 것과는 다르게 마스트로 유입된 후 주변 선체 내부의 도체로 섬락이 발생하거나 물로 방전될 수도 있다. 여기서 내부의 도체란 사람이 될 수도 있음을 의미한다. 추가적으로 낙뢰에 의한 선박과 인명을 보호받기 위한 수단은 금속물체들의 본딩이다. 본딩의 근본적인 목적은 접지와 같이 사람이나 기기 등을 낙뢰의 영향으로부터 보호하는 것이다. 하지만 원리적으로 보게 되면 접지와는 다르다. 접지는 피뢰설비를 바다와 연결함으로써 낙뢰로 인해 유입된 전류를 대지로 방류하기 위한 것이고, 본딩은 인접한 두 개의 도체를 연결하여 양 도체 사이에 상존할 수 있는 전위차(potential difference)에 의한 신체위험 또는 이로 인한 기기의 손상 등을 방지하기 위한 것이다. 본딩은 선체의 낙뢰로 인해 유입된 전류의 경로를 제공하고 서로 연결된 장비들이 등전위(Equipotential)에 있도록 하여 낙뢰로부터 안전을 보장하는 것이다. 또한 측면섬락(Sideflash)로 인한 손상을 방지하기 위하여 측면섬락이 발생할 우려가 있는 선체내부의 모든 장소에 설치된 금속 물체에는 도체로서 전기적 연속성을 가지도록 연결하여 접지판이나 본딩바에 접속시켜야 한다. Fig. 5는 본딩이 되어 있지 않은 선체를 나타낸 것이며, Fig. 6은 본딩이 되어 있는 선체의 모습을 보여주고 있다. 본딩이 되어있지 않다면 낙뢰발생시에 인하도선과 선체사이에 전위차가 발생하여 측면섬락의 영향으로 전기 · 전자 기기의 손상이나 인명의 손실을 유발할 수 있다. 반면 Fig. 6에서처럼 선체에 설치된 금속물체들이 본딩이 되어 있다면 뇌격전류는 선체내부로 영향을 주지 않고 경유해서 바다로 흘러갈 것이다. 이러한 이유로 선박내부의 금속물체들의 본딩은 필수적이다.

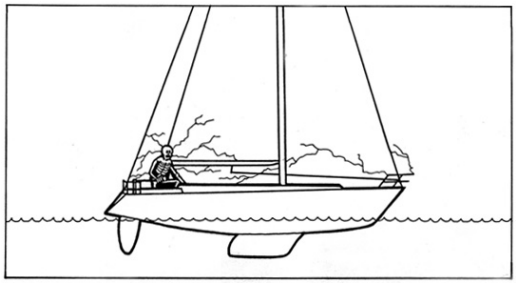

Fig. 5 본딩이 되어있지 않은 선체

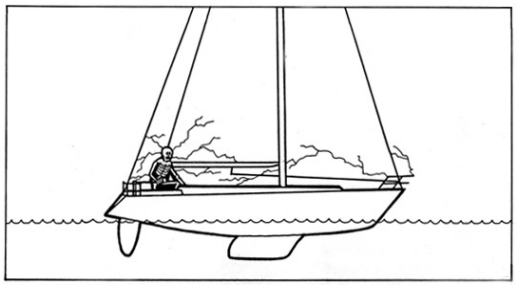

Fig. 6 본딩이 되어있는 선체

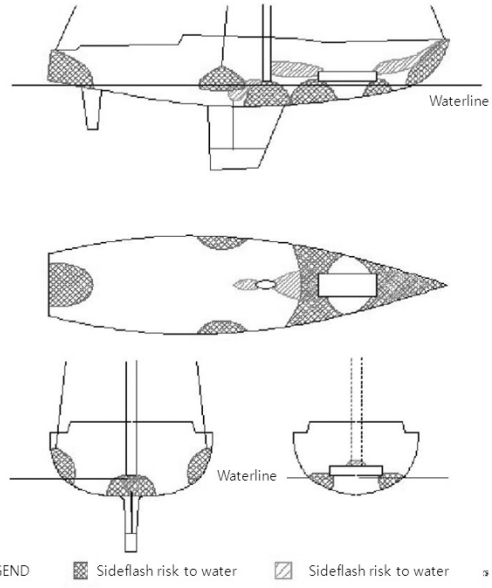

Fig. 7 측면섬락(Sideflash) 위험 구역

Fig. 7은 측면섬락이 일어날 수 있는 위험 구역을 나타낸다. Fig. 7은 요트를 간이화하여 표현하였고 마스트, 탱크, 러더 등을 표현하였으며 모두 도전성 금속으로 구성되어 있다. 격자로 표현된 부분은 물과의 측면섬락이 일어날 수 있는 구역을 표현하였으며, 사선으로 표현된 부분은 도체와 도체 사이에서 사이드 플래시가 일어날 수 있는 장소를 표현하였다. 그림에서 중앙에 위치해 있는 마스트에서 내려오는 인하도선과 오른쪽에 위치해 있는 탱크는 도체이기 때문에 인하도선과 접지가 연결된 부분에서 측면섬락이 일어날 수 있다. 또한 선체의 앞부분과 뒷부분 또는 마스트의 지지대등 도체로 구성되어 있는 부분은 측면섬락이 일어날 수 있는 위험이 높다. 이와 같은 측면섬락을 방지하기 위해서는 본딩을 필히 설치해야만 한다.

3. 국내 · 외 기술기준 현황

KS V ISO 10134(소형 선박-전기기구-낙뢰 보호장치: Small craft-Electrical devices-Lightning protection systems)는 2003년에 제2판으로 발행된 ISO 10134 Small craft-Electrical devices-Lightning protection systems를 번역하여 기술적 내용 및 규격서의 서식을 변경하지 않고 작성한 한국산업표준이며, NFPA 780(Standard for the installation of lightning protection systems)은 미국연방방재협회(National Fire protection Association)의 기술위원회(Technical Committee on Lightning Protection)에서 제시하는 피뢰설비에 관한 표준으로, 본 논문에서 활용된 것은 2004년도에 발표된 내용이다. NFPA 규격은 화재보험 기준으로 사용되는 전기규격으로 채택되어 있으며 NEC규격의

모체이다. 영국 규격을 모델로 독일과 프랑스 등 유럽 규격을 기본으로 하고 있는 IEC규격과 비교해 볼 때 구체적이고 실무적인 내용으로 구성되어 있다. NFPA 780, Chap.8(Protection for Watercraft)에서는, 선박에서 갖추어야 할 피뢰설비에 대한 내용을 선박의 형태에 따라 적용규정을 명시하고 있으며 피뢰설비의 규격을 보다 구체적으로 다루고 있다.

KS V ISO 10134에서는 24 미터 이하의 소형 선박에 설치되는 피뢰설비의 설계, 제작 및 설치에 대한 지침을 규정하고 있으며 낙뢰 방호에 대한 일반 지침으로써는 다음과 같은 사항을 명시하고 있다.

낙뢰로부터 인명 및 소형 선박을 보호하는 것은 설비의 설계 및 이들의 구성과 개인의 운용방식에 따라 달라진다. 이 규격에 포함되어 있는 기본 지침은 피뢰설비를 설계 및 설치하는데 있어 고려하고 사용해야 한다. 다만, 선박의 구조, 설계의 광범위한 다양성과 예상이 불가능한 낙뢰의 특성에 비추어 볼 때 모든 경우를 망라하는 특정 권고 사항을 규격화하는 것은 불가능한 일이다. 적절한 피뢰접지도체 또는 피뢰 마스트를 설치하기 위하여 피뢰 마스트의 최상부에서 피뢰 접지판까지 회로 전체는 기계적 강도와 단면적 21제곱밀리미터 구리 도체 이상의 전도율을 가져야 하며, 도체에 의한 대지까지의 경로는 본질적으로 직선이어야 한다. 선박에 설치된 탱크, 기관, 갑판 윈치, 난로 등과 같은 대형 금속 물체가 모든 피뢰 접지 도체의 2미터 이내에 있는 경우, 접지 도체에서 금속 물체까지 가장 가까운 지점에서 뇌격전류가 유기되어 스파크, 또는 사이드 플래시가 발생하는 경향이 강력해진다. 그러한 사이드 플래시로 인한 손상을 방지하기 위하여 사이드플래시가 발생할 수 있는 모든 장소에 최소 단면적 13제곱밀리미터 구리 도체 이상의 피뢰 본딩 도체를 설치하여야 한다. 소형 선박의 전기시스템의 일부가 아니고 자체 기능 또는 기타 요건으로 인해 아직 접지되지 않은 대형 금속 물체는 피뢰 접지판에 직접 접지할 수 있다. 다만 피뢰 접지 도체 또는 피뢰 본딩 도체와 교차하여 접속해서는 안되며 접지 시스템 또는 본딩바에 직접 접속해야 한다. 또한 KS V ISO 10134에서는 재료에 대한 조건을 명시하고 있다. 낙뢰 방호 장치에 사용되는 재료는 내식성을 지녀야 하며, 이종 금속간의 접합을 피하기가 불가능한 경우, 그러한 목적을 위해 이용할 수 있는 두 금속과 갈바닉 전기에 의해 조화를 이루는 적절한 판 또는 특별한 접속기를 사용하여 부식 효과를 감소시킬 수 있어야 할 것을 재료의 조건으로 요구되고 있다. NFPA 780에서도 피뢰설비로 사용되는 재료의 조건을 명시하고 있다. 우선 피뢰설비에 사용되는 재료는 부식에 대한 저항성을 지닐 것을 KS V ISO 10134와 동일하게 제안하고 있으며, KS V ISO 10134와 마찬가지로 이종 금속간의 접합을 피하는 것이 불가능한 경우에는, 스테인레스스틸이 알루미늄과 구리사의 연결에 사용되는 것과 같이 도금 또는 특수한 연결장치를 사용함으로써 부식 효과를 감소시킬 수 있어야 한다는 것을 명시하고 있다. 예외적으로는 선박구조물의 일부가 되는 알루미늄이나 강으로 된 도전성 물질의 사용이 가능하며 이 경우에는, 단면적 21제곱밀리미터 이상의 구리 도체와 동등한 전기적 성능을 유지해야 한다. 피뢰 시스템에 사용되는 모든 구리도체는 전기적으로 본딩작업이 필요하며, 98퍼센트 도전성을 제공할 수 있도록 제련되어져야 한다는 점을 KS V ISO 10134와 다르게 예외 규정을 두고 있다.

다음으로는 도선관련 규정이다. 위의 KS V ISO 10134 일반 사항에서도 명시했듯이 일반 도선은

단면적이 13제곱밀리미터 이상인 연동선(stranded copper)이거나 단면적 13제곱밀리미터 구리선의 도전율 이상이어야 한다. 도선은 적어도 19개의 소선을 가져야 하며, 금속 리본 또는 스트립의 두께는 1밀리미터 이상이어야 한다.

NFPA 780의 도선 규정은 주 인하도선의 단면적은 41,740Cir.Mils(단면적 21.16 ㎟)이상이어야 하며, 두 개의 병렬 경로를 지닌 인하도선의 단면적은 각 No.6 AWG (13 ㎟)이상이어야 하며, 세 개 이상의 병렬 경로를 지닌 인하도선의 각 단면적은 No.8 AWG(8 ㎟)이상이어야 한다. 또한 구리 리본이나 스트립의 최소 두께는 No.20 AWG 이상(두께 0.813㎜)이어야 하며, 구리 외의 다른 물질이 사용되는 경우에는 제시된 구리도선의 규격과 동등 이상의 전도율을 지닐 수 있도록 해야 한다.

접지시스템에 있어서는 접지판을 사용하는 경우에는 KS V ISO 10134와 NFPA 780에는 면적 0.1미터(NFPA 780에서는 0.09미터), 접지스트립의 경우에는 두께 5밀리미터(NFPA 780에서는 4.8밀리미터) 너비 19밀리미터 이상의 규격이 제시되고 있으나 NFPA 780에는 추가적으로 접지판의 두께와 접지스트립의 길이를 각각 4.8밀리미터, 1.2미터 이상을 가지도록 규정하고 있다. 접지시스템의 대체 수단으로서 수선하부의 선체외판에 부착된 금속체 물체(금속제 용골 및 센터보드 등)를 접지장치로 사용할 수 있도록 규정하고 있다.

선박이 낙뢰의 위험으로부터 보호받기 위해서는 수뢰부의 배치를 적합하게 함으로써 보호영역 안에 선박전체가 포함되도록 해야 할 것이다. KS V ISO 10134에서는 이와 관련해서 낙뢰 보호 마스트의 높이에 대해 명시하고 있으며, 마스트 높이가 수면 상부로 15 미터미만인 경우, 보호각법에 의한 보호영역이 제공된다. 보호각의 결정은 KS C IEC 62305에서 Fig. 8과 같이 피뢰시스템등급(Lightning Protection System Level)과 수뢰부의 높이에 따라 결정된다.

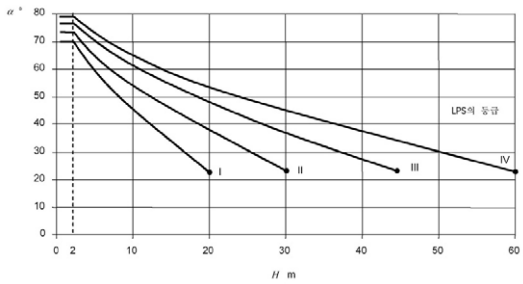

Fig. 8 수뢰부의 높이와 보호각의 결정

선박이 LPS등급 Ⅱ를 적용 받고 수뢰부가 15미터 정도이면 보호각은 45도이므로 반지름은 마스트 높이와 대략 동일하다.

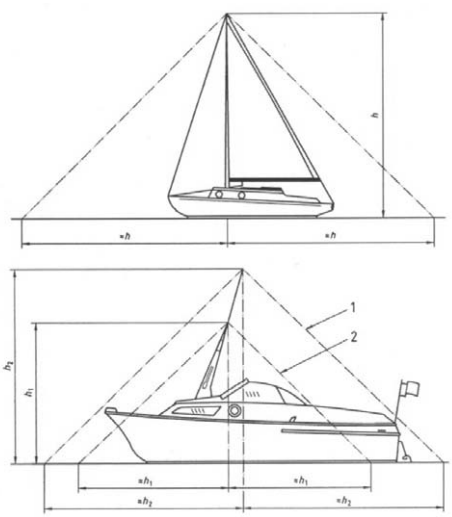

Fig. 9 15미터미만의 마스트를 가진 선박

h : 마스트 높이
1. 선박 전체를 보호하기 위해 낙뢰 보호 마스트의 높이를 연장한 안테나를 가진 보호 영역
2. 낙뢰 보호 마스트만을 가진 보호 영역

마스트의 높이가 15 미터를 초과하는 선박에 대해서는 NFPA 780 및 KS V ISO 10134에서는 뇌격거리 30 미터에 기초를 두고 있으며, 마스트의 형상이나 돌출된 도전성 물체에 의하여 주어지는 보호범위는 Fig. 10에 주어지는 것과 같다. 마스트 높이가 수면 상부로 15 미터를 초과하는 경우, 보호영역은 뇌격거리를 기준으로 하며 대지로 최종 방전이 발생하는 지점의 뇌격거리 내에 있는 모든 접지 물체에 뇌격이 가해지기 때문에 보호영역은 원형의 아크에 의해 규정된다. 아크의 반지름은 뇌격거리 30미터이다. 원호는 마스트의 최상부에 닿으며, 수면과 접선을 이룬다. 2개 이상의 마스트를 사용하는 경우, 보호 영역은 모든 마스트의 원호에 의해 규정된다. 추가 낙뢰 보호 장치는 단일 마스트를 사용하기에 비현실적인 소형 선박을 보호하기 위하여 보호 영역이 중첩되도록 직립되어 있어야 한다.

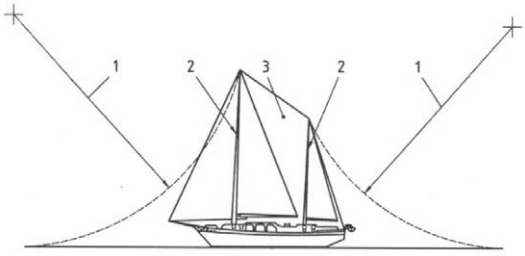

Fig. 10 15미터를 초과하는 마스트를 가진 선박

1. R : 30 미터
2. 15 미터를 초과하는 마스트
3. 파선(dashed lines)에 의해 형성된 구역 내의 보호 영역

KS V ISO 10134 및 NFPA 780에서는 영구적인 마스트가 없는 소형 선박은 낙뢰 상태가 관찰될 경우에 임시 피뢰 마스트를 이용할 수 있도록 규정하고 있으며, 영구적인 마스트가 없는 경우 피뢰 마스트의 대체 수단에 대해서 아래의 조건들을 만족하도록 하고 있다.

- ○ 본질적으로 직선일 것
- ○ 마스트에 확실히 고정시킬 것
- ○ 적어도 마스트 상부로 150밀리미터 연장할 것
- ○ 가능한 한 접지 접속기까지 직접 유도할 것
- ○ 선박 전체와 설치된 장비, 부속품을 포함하는 영역을 보호할 수 있는 보호영역을 제공할 수 있는 높이를 가질 것
- ○ 단면적 21제곱밀리미터 구리 도체이상의 도전성을 가질 것
- ○ 수뢰부의 기본적인 위치는 선박 위에 사람이 물리적으로 수뢰부 또는 수뢰부의 지지물에 직접 접촉하는 것을 피할 수 있는 위치에 설치될 것
- ○ 위의 조건이 만족되는 경우 무선설비의 안테나를 피뢰 마스트로 활용할 수 있다.

무선안테나를 수뢰부로 사용하는 경우에는 뇌격전류가 흐를 때 로딩코일은 높은 임피던스를 보이기 때문에, 뇌격전류가 유입되는 것을 막고, 뇌격전류를 물로 방류하기 위해 로딩코일은 짧아야 한다. 추가적으로 뇌서지로부터 무전기를 보호하기 위해 안테나와 무전기본체 사이에 서지보호장치(SPD : Surge Protection Device)가 함께 설치되어져야 한다. Fig. 11은 안테나와 무전기사이에 SPD를 설치하여 낙뢰시 뇌격전류가 안테나에서 무전기로 흐르지 않고 SPD를 거쳐 접지로 흘러가도록 하여 무전기가 낙뢰로부터 보호되는 이미지를 보여준다.

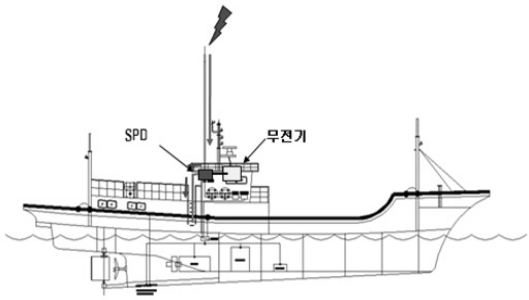

Fig. 11 무전기 안테나와 SPD

4. NFPA 780에 의한 낙뢰위험성 평가

NFPA 780(Standard for the installation of Lightning Protection Systems) 부속서 L에서 구조물에 피뢰설비의 설치여부를 판단하기 위한 방안으로 낙뢰 리스크에 대한 평가방법을 규정하고 있다. 여기에서는 구조물이 위치한 지역의 연간낙뢰빈도(N_d)와 구조물의 허용낙뢰빈도(N_c)를 구하여 두 값을 비교함으로써 피뢰설비의 설치여부를 판가름한다. 연간낙뢰빈도는 구조물이 위치하는 특정지역에 발생하는 연평균 낙뢰밀도와 구조물의 주변환경 및 형상에 따라 결정된다. 허용낙뢰빈도는 구조물의 재질, 가치, 사람의 거주여부 및 낙뢰발생 시 파급되는 환경문제를 고려하여 허용되는 연간낙뢰회수를 말한다. Fig. 12은 낙뢰 리스크 평가에 대한 개략적인 순서를 나타낸다. 즉 연간낙뢰빈도와 허용낙뢰빈도를 산출한 후 두 평가 요소의 크기를 비교해 연간낙뢰빈도가 크다면 낙뢰보호시스템을 의무적으로 설치하여야 하며, 허용낙뢰빈도가 크거나 같으면 낙뢰보호시스템을 사용자의 선택사항으로 규정하고 있다.

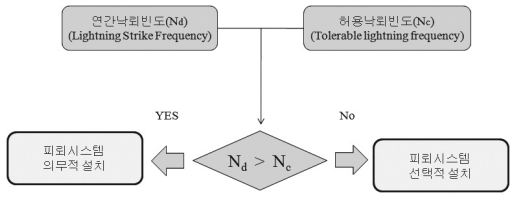

Fig. 12 낙뢰 위험성 평가 방법

연간낙뢰빈도(N_d)는 낙뢰밀도(N_g), 등가수뢰면적(A_e) 및 환경계수(C_l)를 곱하여 구해지며, 낙뢰밀도는 한국전력연구원에서 2006년부터 2008년까지 측정한 우리나라 동해, 서해 및 남해에서 발생한 낙뢰밀도를 근거로 하였고 등가수뢰면적은 소형선박의 수면상부높이(H : 3미터)를 적용하였다. 환경계수(C_l)은 3H에 해당하는 구조물 주위에 다른 구조물이 존재하지 않는 것으로 간주하여 1.0을 적용하였다.

$$N_d = (N_g)(A_e)(C_l)$$

N_g (낙뢰밀도) = (동해 : 1.0, 남해,서해 : 2.5)

A_e (등가수뢰면적) = $(9\pi H^2) \times 10^{-6}$㎢

C_l (환경계수) = 1.0

동해의 연간낙뢰빈도(N_d) = 2.54×10^{-4}

남,서해의 연간낙뢰빈도(N_d) = 6.35×10^{-4}

허용낙뢰빈도(N_c)는 아래의 식을 사용하여 구할 수 있으며, 비금속제 소형선박의 허용낙뢰빈도의 산출결과는 아래와 같다.

$$N_c = -\frac{1.5 \times 10^{-3}}{C}$$

$C = (C_2)(C_3)(C_4)(C_5)$

C_2 (구조물계수) : 3.0

C_3 (구조물용도계수) : 3.0

C_4 (구조물점유계수) : 3.0

C_5 (낙뢰피해계수) : 5.0

Table 3 구조물계수(C_2)

구조물	건물의 지붕		
	금속성	비금속성	가연성
금속성	0.5	1.0	2.0
비금속성	1.0	1.0	2.5
가연성	2.0	2.5	3.0

Table 4 구조물 용도계수(C_3)

구조물 용도 계수	C_3
저가이며 비가연성	0.5
표준가이며 비가연성	1.0
고가이며 가연성	2.0
고가이며 가연성, 또는 컴퓨터나 전자제품	3.0
특고가이며 고유의 문화재	4.0

Table 5 구조물 점유계수(C_4)

구조물 점유계수	C_4
사람이 거주하지 않는 경우	0.5
일반적인 주거 구조물인 경우	1.0
대피하기 어렵거나 공황 상태의 위험성이 있는 경우	3.0

Table 6 낙뢰피해계수(C_5)

낙뢰피해계수	C_5
지속적인 시설관리가 필요하지 않고, 환경에 영향을 미치지 않는 경우	1.0
지속적인 시설관리가 필요하고, 환경에 영향을 미치지 않는 경우	5.0
환경에 영향을 미치는 경우	10.0

허용낙뢰빈도(Nc) = 0.11×10^{-4}

낙뢰위험성평가를 수행한 결과 연간낙뢰빈도가 허용낙뢰빈도와 비교해서 큰 값이 도출되었다. 따라서 우리나라의 연안에서 운항하는 비금속제 소형선박은 피뢰설비를 갖추어야 한다는 결론을 얻었다.

Table 7 비금속제 소형선박 낙뢰리스크 평가

연간낙뢰빈도	비 교	허용낙뢰빈도
$N_d=(N_g)(A_e)(C_1)$		$N_c=-\frac{1.5\times10^{-3}}{C}$
동해 $1.0\times254\times10^{-6}\times1$ $=2.54\times10^{-4}$	>	$\frac{1.5\times10^{-3}}{3\times3\times3\times5}$ $=0.11\times10^{-4}$
남해, 서해 $2.5\times254\times10^{-6}\times1$ $=6.35\times10^{-4}$	>	

5. 피뢰시스템의 규격 선정

5.1 수뢰부와 인하도선의 규격

조사한 국내 · 외의 규정에 의한 수뢰부의 크기를 비교해 보면 KS V ISO 10134와 NFPA 780에서는 구리나 금속제 재질로써 단면적 21제곱밀리미터 이상으로 사용하도록 하였다. 다만, 보다 엄격한 규정을 적용받는 고속선의 경우에는 단면적 70 제곱밀리미터 이상의 구리재료를 사용하도록 되어 있으며 이는 육상건축물의 피뢰설비에 대한 내용을 그대로 인용한 것으로 판단된다. 인하도선의 규격도 수뢰부와 동일한 치수의 재질을 사용해야 하는 것으로 나타났다.

Table 8 수뢰부 규격의 비교

규 정	재 질	규 격
KS V ISO 10134	금속제, 구리	21㎟ 이상
NFPA 780	금속제, 구리	No.4 AWG 21㎟ 이상
고속선 기준	구리, 알루미늄	70㎟
ABS HSC-Code	구리, 금속제	50㎟

하지만, 육상건축물에 적용되는 KS C IEC 62305-3(피뢰시스템-구조물의 물리적손상 및 인명위험)에 따르면 수뢰부 및 인하도선의 치수는 고속선규정과 동일하지만 기계적 강도와 용융점을 고려해서 단면적 16제곱밀리미터까지 완화할 수 있도록 규정되어 있고 비금속제 소형선박에도 이를 감안한 수뢰부와 인하도선의 규격을 선택하는 것이 현실적일 것이다.

5.2 접지시스템의 규격

접지판의 면적을 산출하는 데는 4각형 접지 전극을 산출하는 식들이 있다. 4각형 접지 전극으로는 정사각형과 직사각형의 접지 전극이 사용되고 있다. 접지 저항은 단면적이 같은 등가의 원판형 접지 전극으로 치환하여 산출하는 방법이 일반적으로 적용되고 있다. 원판형 접지전극으로 등가화시켰을 때 접지저항의 산출에 대한 계산식은 충분한 깊이에 매설된 경우 다음 수식과 같다.

$$R = -\frac{\rho}{4}\sqrt{\frac{\pi}{a \cdot b}}$$

a : 가로의 길이[m]

b : 세로의 길이[m]

ρ : 대지 및 해수의 저항율[Ωm]

정사각형의 경우는 a=b로 하여 산출하면 된다. Fig. 13에 나타낸 바와 같이 대지 표면으로부터 h[m]의 깊이에 수평으로 매설된 4각형 접지전극의 가로와 세로의 길이를 각각 a, b(a≤b)라고 할 때 접지저항의 산출을 위한 계산에는 다음의 Higgs, H.B. Dwight 및 R. Rudenberg의 수식이 제안되어 이용되고 있다.

Higgs의 식

$$R = -\frac{\rho}{4\pi ab}\left[3.1\sqrt{\frac{ab}{1+0.0375(b/a)}} + \frac{ab}{2h}\right]$$

H.B.Dwight의 식

$$R = -\frac{\rho}{8\sqrt{ab/\pi}} + \frac{\rho}{8\pi h}\left(\frac{1-7ab}{48\pi h}\right)$$

R.Rudenberg의 식

$$R = -\frac{\rho}{2\pi b}\,ln\,\frac{4b}{a}$$

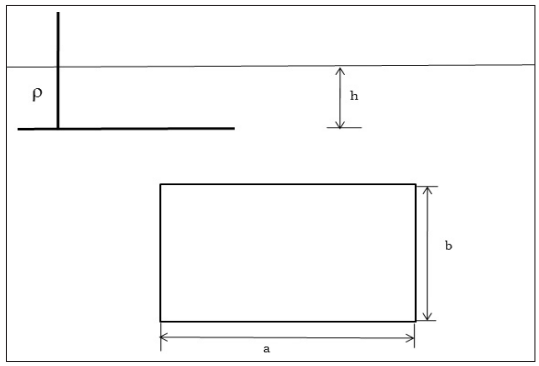

Fig. 13 평판형 접지 전극

여기서 사용되는 ρ[Ωm]는 해수의 저항률을 사용해야 하며, 해수의 온도에 따른 저항률은 Table 9와 같다.

Table 9 해수의 저항률

온도[℃]	10	15	20	25
ρ [Ωm]	0.268	0.237	0.212	0.192

또한 NFPA 780과 KS V ISO 10134에서 제안하고 있는 가로, 세로 길이는 최소 길이인 0.3미터를 기준으로 삼았다. 위의 수식과 해수의 저항률을 고려하여 접지판의 면적을 산출해 본 결과는 Table 10과 같다.

Table 10 접지저항 값

산출방식	접지저항 값	
	최소값[Ω]	최대값[Ω]
Higgs 식	0.163	0.227
Dwight 식	0.149	0.2085
Rudenberg 식	0.141	0.197

NFPA 780에서 제안하는 단면적 0.09제곱미터의 접지판 단면적은 수학적으로 계산했을 때 모두 1Ω 보다 작은 매우 작은 값을 나타내게 된다. 이는 해수의 저항률이 대지의 저항률에 비해 극히 작은 값을 지니기 때문이며, 따라서 대지에서 선정하는 접지판의 면적보다 작은 면적을 선정하여도 대지에 비해 전위상승이 크지 않음을 나타낸다. 따라서 NFPA 780에서 제안하는 접지판의 단면적을 본 연구의 접지판의 단면적으로 선정하는 것은 합리적인 산출 값으로 결정할 수 있다.

긴 띠 모양 접지전극을 접지 스트립으로 해석할 수 있다. 이러한 접지 스트립을 시설하면 대지 또는 해수와의 접촉 면적이 증가하여 접지 저항을 보다 낮출 수 있다. Fig. 14에 나타낸 바와 같이 길이 l, 폭 b, 두께 c인 띠 모양의 접지 전극을 저항률 p [Ωm]인 표면으로부터 h의 깊이에 수평으로 매설된 경우 접지 저항을 산출하는 계산식을 알아본다. 띠 모양 접지 전극의 길이 l이 폭 b나 두께 c에 비해서 대단히 큰 경우 접지저항의 산출에는 다음과 같은 R.Rudenberg 및 H.B.Dwight의 식이 제안되어 이용되고 있다.

R.Rudenberg의 식

$$R = -\frac{\rho}{2\pi b}\ ln\ \frac{4b}{a}$$

H.B.Dwight의 식

$$R = -\frac{\rho}{2\pi l}\left(ln\frac{2l}{b} + \frac{b^2-\pi bc}{2(b+c)^2} + ln\ \frac{l}{h} - 1 + \frac{2h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{2l^4}\right)$$

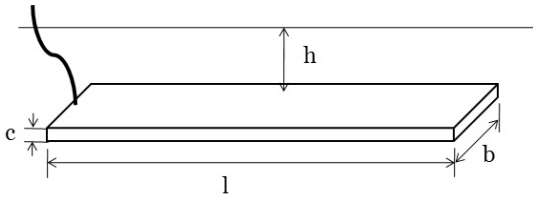

Fig. 14 띠 모양 접지 전극

접지판의 산정과 동일하게 ρ는 해수의 저항률을 나타내고 있으며, b는 NFPA 780과 KS V ISO 10134에서 제시하고 있는 최소 19밀리미터의 폭, 길이 1.2미터를 두께는 4.8밀리미터를 적용하였으며, 기본적으로 접지판은 수면 아래 1미터이하에 위치하고 있기 때문에 h는 1미터를 적용하였다. 이러한 파라미터들을 적용하여 위의 수식을 정리, 계산한 값은 Table 11과 같다.

Table 11 접지스트립의 접지저항 값

산출방식	접지저항 값	
	최소값[Ω]	최대값[Ω]
R.Rudenberg 식	0.141	0.197
H.B.Dwight 식	0.135	0.188

접지스트립이 접지판에 비해 미세하게 접지 저항값이 적은 것을 확인할 수 있다. 접지스트립도 접지판과 마찬가지로 접지 저항 값은 피뢰기 설비에 해당하는 제1종 접지공사 조건인 10Ω이하의 값을 보여야 한다. NFPA 780과 KS V ISO 10134에 제시되어 있는 최소 규격으로 산출해 본 결과 모두 10Ω이하의 제 1종 접지공사의 조건을 만족하고 있고, 저항값이 매우 작으므로 뇌격 전류를 방류시 전위상승이 크지 않을 것으로 예상되며, 따라서 KS V ISO 10134와 NFPA 780에서 제시하고 있는 규격을 실제 소형 선박 설계시 사용하는 것은 합당한 규격을 활용하는 것으로 간주될 수 있다. 그러나 접지스트립과 접지 판의 선택에 있어서는 사용자의 조건에 따른 선택사항이 될 것이다.

5.3 등전위 본딩

낙뢰에 의한 피해는 직격뢰에 의한 것과 간접적인 유도뢰에 의한 피해로 나누어 볼 때 유도뢰에 의한 피해가 훨씬 더 많은 것으로 알려져 있다. 점차적으로 보호구조물 내부에 전자전기장비가 늘어나는 추세에 비추어 볼 때 낙뢰지점과의 전위차에 의해서 발생되는 간접적인 피해도 증가할 것이다. 실제로 선박에서 발생되는 무선설비나 위성항법장치 등 전자장비의 회로소손 사고가 단정할 수는 없지만 유도뢰에 기인한 것도 있을 것이다. 등전위 본딩은 선박의 외부나 내부에 설치되어져 있는 전기설비 및 도전성 금속물체들을 전기적으로 연속성을 갖도록하여 특정한 물체에 낙뢰가 유입되더라도 전기적으로 연속된 물체들이 전위차를 해소함으로써 낙뢰로부터의 설비와 인명을 보호할 수 있다. 조사한 국내외의 규정에서도 피뢰설비와 관련해서 도체의 치수는 규정별로 약간의 차이는 있으나 낙뢰본딩도체의 필요성을 언급하고 있다. Table 12는 규정별로 본딩도체의 규격을 보여주고 있다.

Table 12 각 규정의 낙뢰 본딩도체 설치

규 정	본딩 도체의 최소 굵기(mm^2)
KS V ISO 10134	13
NFPA 780	8
고속선 규정	5

설비의 특성상 피뢰설비, 저압 전원계통, 통신시스템 등의 접지시스템을 반드시 분리해야 하는 경우에는 낙뢰가 침입하였을 때 유기되는 각 접지극 사이의 전위차에 의해서 설비나 기기 등의 파손을 방지하기 위해서 Fig. 15에 나타낸 예와 같이 공용접지극에 접속할 수 있다. 다시 말하면 등전위본딩바에 서지보호장치를 이용하여 접속하면 뇌격전류에 의해서 각 접지극 사이에 형성되는 전위차의 발생을 방지할 수 있다.

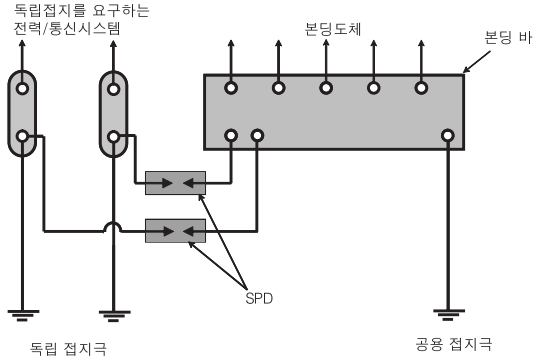

Fig. 15 등전위 본딩의 예

6. 결 론

피뢰설비를 갖추더라도 100%의 보호효율을 가지지 못하는 것으로 알려져 있다. 자연재해에 완벽한 대비책을 갖출 수는 없다. 다만 효율적이고 객관적인 통계에 의한 안전대책을 수립하고 이행함으로써 재해의 위험에서 보호될 수 있을 것이다. 모든 소형선박에 별도의 피뢰설비를 갖추는 것이 경제적인 측면에서는비효율적인 방법일지도 모른다. 따라서 가능한 자연적구성부재인 선박자체의 구조물이나 설비를 이용해서 피뢰시스템을 구성한다면 경제적으로 피뢰설비를 구성할 수 있을 것이다. 충분하게 높은 위치에 있는 선박의 마스트나 무선안테나를 수뢰부로 사용하고 금속제방현재를 등전위모선으로 활용하여 선박외부에 있는 금속물체를 전기적 연속을 가지도록 하며 선박의 전선으로 사용되는 차폐선을 접지함으로써 피뢰시스템을 구성한다면 효과적으로 낙뢰로부터 보호받을 수 있을 것이다. 이 논문의 내용은 소형선박 뿐만 아니라 소형선박이외의 비금속제 선박에서도 피뢰설비지침으로 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

참고문헌

(1) KS V ISO 10134 소형 선박- 전기 기구- 낙뢰 보호 장치

(2) 이복희, "뇌보호", 인하대학교 출판부, pp.13~21, pp.55~57 , 2004.

(3) Marine lightning protection : http://www.marinelightning.com

(4) 고속선기준

(5) 한전낙뢰감시네트워크 : http://www.lightning.or.kr/index.jsp : 낙뢰밀도 및 일수 참고

(6) NFPA 780 standard for the installation of lightning protection systems 2004 edition

(7) 이복희, 이승칠, "접지의 핵심 기초 기술", 도서출판 의제, 1999.

(8) ABS-high speed craft part4 section5 Electrical installation

(9) KS C IEC 62305 - 피뢰시스템

(10) 한국선급 고속경구조선 규칙 - 제6편 전기설비 및 제어설비

(11) 2006판 내선규정 대한 전기협회 저압 설비 위원회

이 논문은 선박안전기술공단의 자체연구개발 사업으로 이루어진 것임을 밝힙니다.