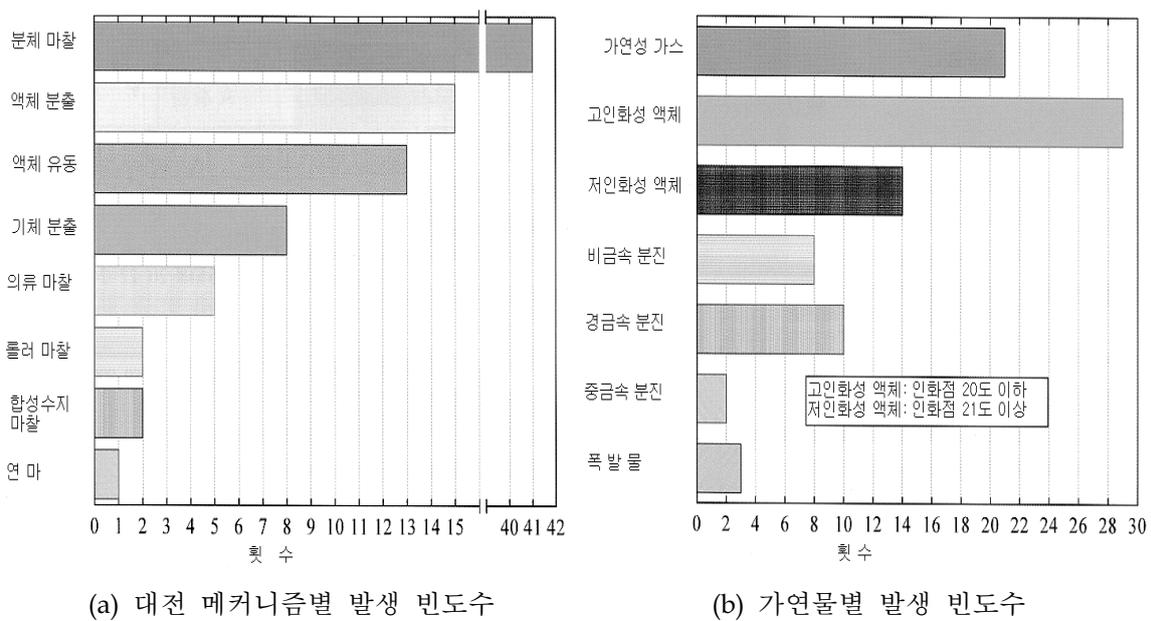


정전기로 인한 폭발·화재의 현상과 기본대책

1. 정전기 재해현상

산업공정에서 발생하는 정전기는 큰 에너지로 느껴지지 않지만, 종종 폭발·화재를 일으키기도 한다. 일본 후생노동성의 자료에 의하면 과거 13년간(1989~2001) 정전기 대전으로 발생한 폭발·화재(88건)의 공정별 발생 건수는 [그림 1(a)]에 나와 있다. 분체 마찰이 절반 이상을 차지하며, 그 다음으로 액체 분출, 액체 유동 또는 기체 분출이 대부분을 차지하고 있다. 의류 마찰, 롤러 마찰, 합성수지 마찰, 연마 등은 비교적 빈도가 낮지만, 이것은 정전기 발생이 적어서가 아니라 가연성 물질과 공존하는 기회가 적은 것에 기인한 것으로 여겨진다. 의류 마찰 중에는 드라이클리닝 기계에서 건조 작업시의 폭발재해(2건)가 포함되어 있다. 이것은 환경문제로 인해 규제가 강화되어 용제를 대체(특정 프레온가스에서 산화수소로)한 것이 배경이다.

다음으로 발화물질별 발생건수는 [그림 1(b)]에 나와 있다. 상온에서 폭발성 혼합기체인 가연성 gas와 고인화성 액체가 절반 이상을 차지한다. 한편, 저인화성 액체도 많은 발화 사례가 있다. 이것은 인화점 이상의 온도에서 취급하다가 분무상태에서 분출된 경우이다. 분진으로는 경금속의 발화가 많다. 최근에는 자동차 부품, 전자기기 등의 재료로서 알루미늄 또는 마그네슘 합금의 수요가 증가함에 따라 제조공정(연마, 집진 등)에서 발생하고 있다.



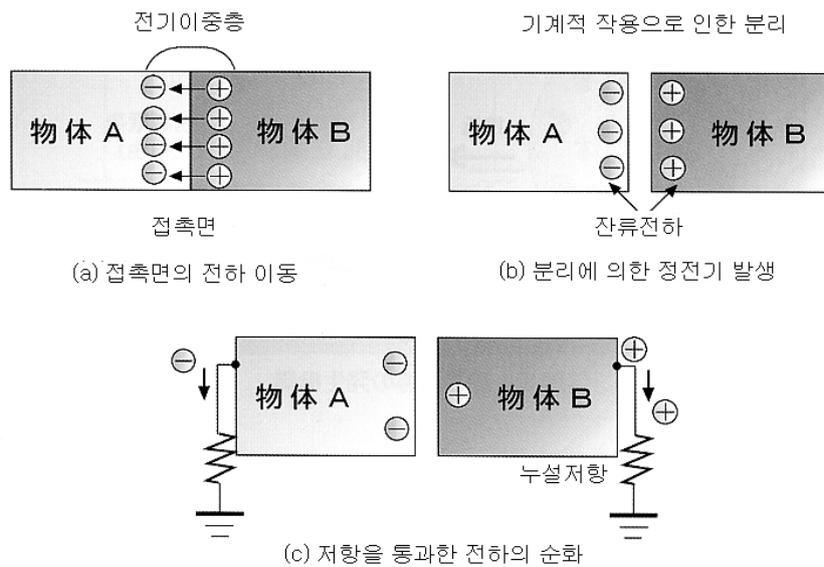
[그림 1] 정전기에 의한 폭발·화재의 발생현황(1998~2001)

2. 정전기 발생과 폭발·화재

◇ 정전기 발생-마찰 정전기와 정전기 유도

정전기의 발생 메커니즘은 다양하지만 노동재해의 관점에서 가장 중요한 것은 마찰 정전기와 정전기 유도이다. 전자는 절연체, 후자는 도체의 중요한 대전 메커니즘이다.

또한, 마찰 정전기는 다른 종류의 물체가 접촉 또는 분리하는 경우에 생기는 정전기이다. 전자를 물질의 표면에 끌어당겨 머물게 하기 위해 필요한 에너지는 물질별로 다르지만, 다른 종류의 물체가 접촉하면 전위차가 생성되고, 이 에너지가 적은 물질로부터 큰 물질로 전자가 이동하여 경계면이 좁아지면 전기의 이중층이 형성된다.[그림2(a)] 적어도 한쪽이 부도체인 경우 물체가 붙었다 떨어질 때에 전자의 일부가 원래 물체로 가지 않고 다른쪽에 남게 된다. 전자를 얻은 쪽은 음(-)이 되고, 잃은 쪽은 양(+)으로 대전된다[그림 2(b)]. 마찰이 많아지는 만큼 접촉면적 및 분리속도가 증가하므로 발생하는 전하량도 증가하지만, 한편으로 단화 메커니즘(전하의 소멸)도 있기 때문에 결국 포화량에 도달한다. 만약에 정전기가 발생되지 않으면, 전하는 대지로 흘러들어가 소실된다[그림 2(c)].



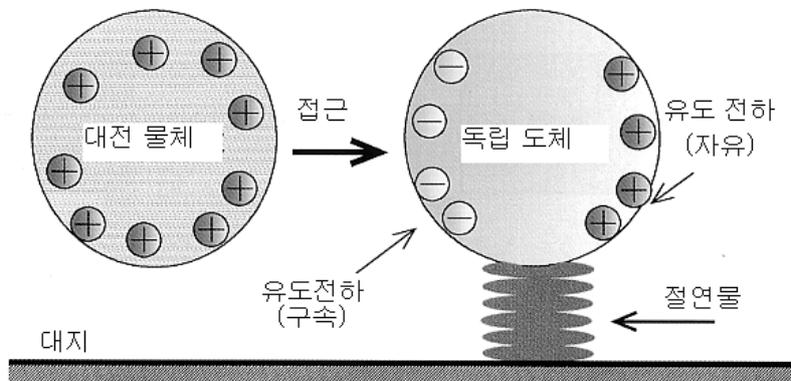
[그림 2] 마찰정전기의 발생 메커니즘

마찰 정전기의 발생경향을 실험적으로 조사해보면, 대전이 되는 순서를 알 수 있다. [표 1]은 그 예로서 마찰 대상이 되는 물질 간의 대전특성(극성 및 대전량)의 기준을 얻는 데 유용하다.

[표 1] 마찰대전 서열

금속	섬유	천연물질	합성수지
+	납	인조모피, 모피	
		유리	
	양모	면	
	나일론		
	비단	목재	
	목면		
	유리섬유	종이	
	아연		
마그네슘	아세테이트	고무	에보나이트
크롬	비닐론		
철		폴리에스틸렌	폴리스티렌
금	아크릴		폴리프로필렌
-	백금		폴리에틸렌
			염화비닐
			테플론

다음으로 정전기 유도는 도체가 절연체에 의해 비접지 상태인 경우, 근처에 대전물체가 접근하면 양 물체간의 전기적 결합에 의해 도체의 전하가 유도되어 동시에 전위도 상승하는 현상이다[그림 3]. 대전물체와 역극성의 전하는 대전물체의 전하와 결합하여 어떤 작용도 할 수 없지만 같은 극성의 전하는 자유로워 방전을 일으키는 착화원이 된다. 또한 방전 후에 대전물체가 멀리 떨어지면, 남은 역극성의 전하가 자유롭게 되어 다시 방전을 일으키게 된다.

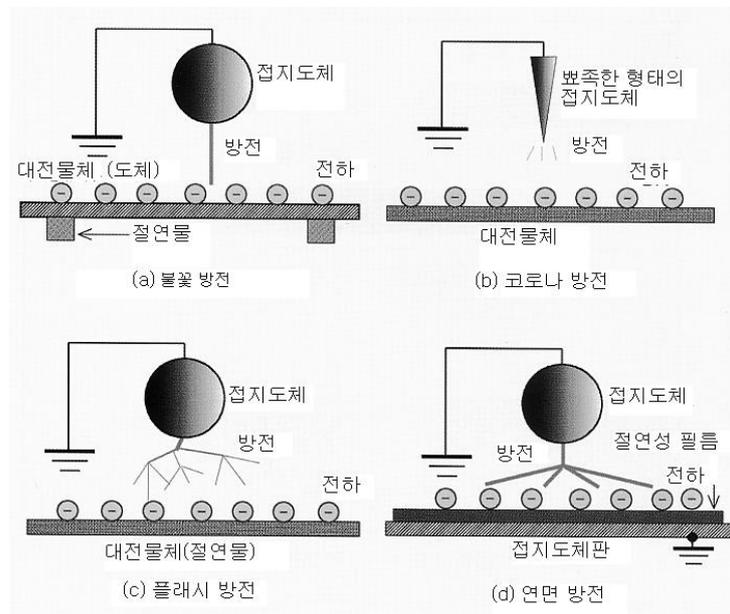


[그림 3] 정전기 유도의 발생 메커니즘

정전기의 발생시스템이 어떠한지 정전기의 발생이 멈추면 누설저항에 따라 대전물체로부터 대지로 전하가 누설되어 소멸된다. 이 소멸의 속도(완화속도)는 대전물체의 정전용량 C 와 누설저항 R 의 곱 $\tau = R \times C$ 가 된다. 이 수치는 전하량이 초기치의 약 0.37배에 이르기 위해 필요한 시간으로 완화시정수라고 한다. 정전기 대전을 방지하기 위해서는 $\tau < 1 \times 10^{-2} \text{s}$ 이어야 한다. 분체 및 액체와 같은 물질에 대해서는 그 저항을 ρ 또는 도전을 κ 와 유전율을 ϵ 을 사용해 $\tau = \epsilon \times \rho = \epsilon / \kappa$ 가 된다.

◇ 정전기의 방전과 폭발·화재

정전기의 방전에너지가 가연성 분위기(가연성 물질과 공기의 혼합물)의 최소착화에너지(MIE)보다 크게 되면, 폭발과 화재를 일으킨다. 그러나 정전기 방전이 아주 다양함에 따라 그 착화능력도 다르다.



[그림 4] 정전기방전 형태와 발생조건

(1) 불꽃방전

대전된 물체에 곡률이 작은 접지도체가 접근한 경우에 발생하는 방전을 말한다[그림 4(a)]. 아주 단시간의 방전으로서 섬광과 과열음을 수반한다.

불꽃 방전에는 대전물체에 축적된 전기에너지의 대부분이 기체 중에 소비되기 때문에 착화능력이 높고, 거의 모든 가연성 가스·증기 및 일부의 가연성 분진이 착화원이 된다. 방전에너지 W 는 대전물체의 전위 V , 전하량 Q , 정전용량 C 중에 2개의 물리량이 밝혀지면 $W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}Q^2/C$ 의 형식으로 계산될 수 있다. 다만, 불꽃방전은 대전물체의 전위 V 가 300V 이하에서는 발생하지 않는다.

(2) 코로나방전

대전물체에 곡률반경이 5mm 이하의 뾰족한 도전성 물체가 접근한 경우 뾰족한 끝부분 근처에서 발생하는 미약한 방전이다[그림 4(b)]. 작은 펄스 상태의 방전이 연속적으

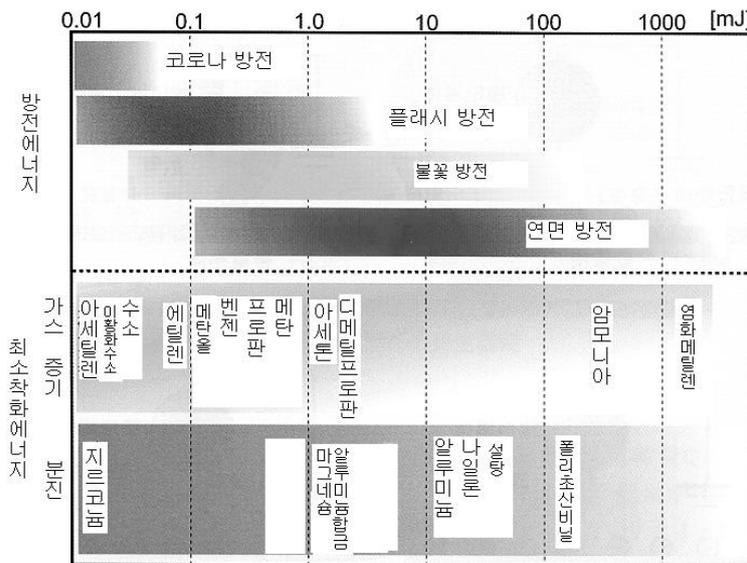
로 발생하며, 방전에너지가 작아 물질의 최소착화에너지가 0.1mJ 이상인 경우에는 발화되지 않는다.

(3) 플래시방전

플래시 방전은 약 10kV 이상으로 대전된 절연체에 곡률반경 5~50mm의 접지도체가 접근한 경우 그 선단 부근으로부터 발생하는 방전이다[그림 4(c)]. 대전 전위가 높으면 방전 펄스가 연속적으로 발생하며, 각 펄스의 에너지가 코로나 방전의 에너지보다 크다. 최대 3~4mJ의 불꽃방전에 상당하는 착화능력을 가진다.

(4) 연면방전

접지된 도체판 위의 절연성 층간이 대전된 경우 이것과 접지도체 사이의 방전이다[그림 4(d)]. 방전광은 표면을 따라 나뭇가지의 형태가 되고, 큰 과열음을 수반한다. (1) 절연체의 두께 8mm 이하, (2) 표면전하밀도 270 μ C/m² 이상, (3) 표면전위 4kV 이상인 조건을 동시에 만족하는 경우 발생한다. 대전면적 및 전하밀도에 의한 방전에너지는 수 J 에 달한다. GL 교반용기, 분체 공기 운송용 플라스틱 배관의 내부 등에서 발생하여 과열(pinhole, 균열 등)을 일으킨다. 방전의 종류와 방전 에너지의 관계를 [그림 5]에 표시하였다.



[그림 5] 방전 에너지와 가연물질의 최소착화에너지(MIE)

3. 정전기 대책의 기초

정전기 대책은 대상이 도체인가 부도체(절연체)인지에 따라 방법이 다르다. 도체의 경우에는 접지 또는 본딩에 따라 전하의 누설경로 확보, 또한 등전위화, 부도체의 경우에는 도전성의 부여, 전하 제거장치의 사용이 기본적인이다.

◇ 도체의 대전방지

(1) 누설저항과 접지설비의 요건

전술한대로 $\tau < 1 \times 10^{-2} \text{s}$ 이기 위해서는 누설저항을 $R < 1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8 \Omega$ 정도로 하면 좋다. 따라서 실제 정전기 대책을 목적으로 한 접지설비의 접지저항은 $1,000 \Omega$ 이하가 되도록 시공하면 충분하다. 전용의 접지설비 뿐만 아니라, 다른 접지설비와 공용으로 해도 된다. 금속제 수도관, 건물의 철골 등 땅속에 깊이 설치된 것들은 100Ω 이하의 접지저항을 가지고 있는 것이 많으므로 접지극으로서 이용하는 것이 가능하다.

(2) 접지선과 본딩

접지용 도선은 물리적·화학적으로 내구성을 가지고 있는 것을 선택해야 한다. 원칙으로서 이동기기에는 캡타이어 케이블, 고정기기는 단선·연선 또는 금속판, 빈번한 탈착이 필요한 경우에는 유연성이 있는 편조선으로 한다.

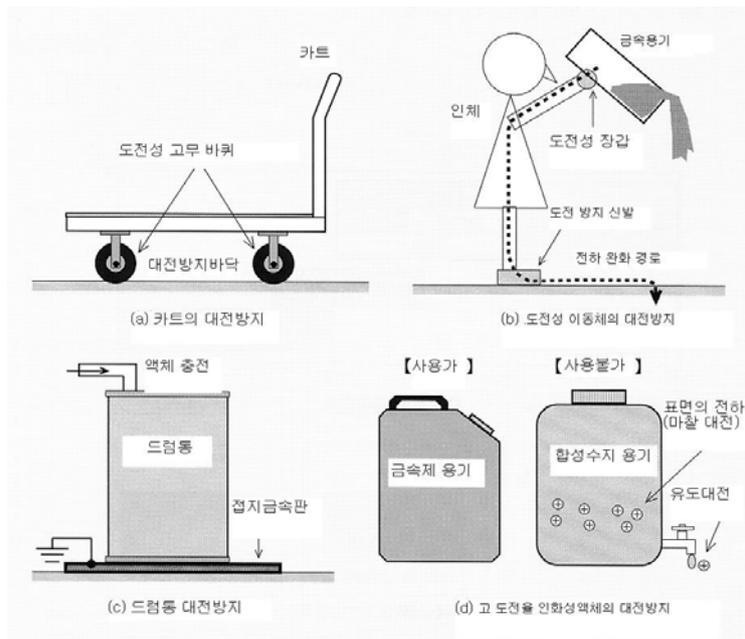
접지대상의 기기와 부자재가 근접하여 다수인 경우에는 이것들을 상호 연결하여 어느 한 부분을 접지극으로서 접속한다. 상호 접속한 것을 본딩이라고 하는데 등전위가 되는 이점이 있다.

(3) 인체의 대전방지

대전물체로서 가장 주의할 점은 작업자의 안전이다. 대전방지 작업복(JIS T8118) 및 도전화(JIS T 81030)를 착용하는 것은 당연하지만, 동시에 바닥도 대전방지(누설저항 $1 \times 10^8 \Omega$ 이하)가 되도록 하지 않으면 효과가 없다.

(4) 기타 실시 예

이동물체, 가연성액체 등에 대한 접지방식은 [그림 6]과 같다.



[그림 6] 도체의 정전기 대책

◇ 부도체의 대전방지

(1) 도전성의 부여

고분자화합물에 도전성을 없애는 방법으로서 대전방지제 또는 도전성 가공의 방법이 있다. 대전방지제는 계면활성제를 주성분으로 하여 도포 또는 주입하여 대상물에 부착시킨다. 표면저항을 $1 \times 10^{12} \Omega$ 이하로 하면 대전방지 효과가 생긴다.

원리적으로는 공기 중의 수분을 흡착하는 것에 의해 도전성을 크게 향상시킬 수 있기 때문에, 주위환경의 습도에 따라 성능이 변화한다. 특히 습도가 낮을 때에는 가습하지 않으면 원하는 성능을 발휘하지 못하는 경우가 많다. 도전성 가공은 카본블랙, 금속분 등을 첨가하는 것에 의해 체절저항을 약 $100M \Omega \cdot m$ 이하로 저하시킬 수 있고 공구, 롤러, 용기, 판금 등 다양한 응용품이 있다.

플랜트용 대전방지품으로는 펌프와 화학반응용기에 도전성 Teflon¹⁾ 라이닝, 백금섬유를 이용한 교반용기용 글라스 라이닝이 실용화되고 있다.

(2) 제전기 사용

제전기는 코로나 방전 또는 방사선에 의해 공기 중에 이온을 생성시켜, 이것을 대전물체에 흡착시킴으로써 전하를 중화하는 것이다. 동작원리 및 용도에 적합한 다양한 종류의 것들이 시판되고 있다. 롤러로 필름을 반송할 때의 대전에는 제전기가 꼭 필요하다.

(3) 정지시간

석유 등의 저도전을 액체를 파이프 운송으로 탱크에 충전 후, 시료채취, 검사 등을 실시하기 전에 전하가 완화될 때까지 대기시간을 갖는다. 이것을 정지시간이라고 하며 통상 완화시정수 τ 의 3~4배로 한다.

4. 결론

정전기는 환경(온도, 습도)의 영향을 받기 쉽고, 또한 공정의 속도 및 자재의 변화에 따라 발생량이 변화한다. 평상시 최악의 조건(정전기의 발생이 많음) 설정으로 리스크 평가를 행하는 것이 필요하다.

출처 : Safety Engineering Vol.144 (2007년 6월)

번역 : 조사연구팀 사원 유호정

1) 열·약품에 강한 플라스틱. 냄비나 다리미 바닥 등에 붙여 눌러붙는 것을 방지함.