

정전기 방전 평가를 위한 간이형 도구 개발에 관한 연구

최 상 원

한국산업안전공단 산업안전보건연구원
(2011. 3. 14. 접수 / 2011. 6. 10. 채택)

A Study on the Development of Simulating Tool for Evaluation of Electrostatic Discharge

Sang-Won Choi

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA
(Received March 14, 2011 / Accepted June 10, 2011)

Abstract : Explosion and fire cause about 30 reported industrial major accidents a year by ignition source which discharge of electrostatic generated to flammable gas, vapor, dust and mixtures. It brings economically and humanly very large loss that accident was caused by fire and explosion from electrostatic discharge. Thus, it is very important that electrostatic discharge energy is to be control below not to be igniting flammable mixtures. There are two kinds of analysis model for electrostatic discharge; human body model and machine model. Human body model is available the parameter of human's electrical equivalent that capacitance is 100 pF, resistance is 1.5 kΩ. To simulate and visualize the electrostatic discharge from human body need a very expensive and high voltage simulator. In this paper, we measured the value of capacitance and resistance concerned with test materials and sizing of specimen and the value of charged voltage concerned with test specimen and distance to develop an electrostatic charge/discharge simulating tool for teaching with which concerned industrial employee and students. The result of experiments, we conformed that the minimum ignition energy of methane-oxygen mixtures meets well the equation $W = 1/2 CV^2$, and found out that the insulating material and sizing of equivalent value having human body mode are the poly ethylene of 200 mm and 300 mm of diameter. Developed electrostatic charge/discharge simulating tool has many merits; simple mechanism, low cost, no need of electric power and so on.

Key Words : Electrostatic Discharge(ESD), ignition hazard, Human Body Model(HBM), Minimum Ignition Energy (MIE)

1. 서론

산업설비, 인체로부터 대전된 정전기의 방전에너지에 의한 가연성 가스·증기·분체로의 화재·폭발사고가 국내의 경우는 대략 연간 30 여건(일본의 경우는 70 여건)이 발생되고 있다. 정전기 방전 에너지에 의한 화재·폭발사고의 특징은 사고 피해가 크다는 것 외에도 정전기의 대전 및 방전 현상의 재현이 곤란하다는 것이다. 그렇기 때문에 정전기에 의한 사고는 원인규명보다는 화재·폭발사고가 발생되지 않도록 산업설비 및 인체로부터의 정전기를 안전수준으로 관리하는 것이 무엇보다 중

요하다¹⁻³⁾.

한편, 정전기 방전(Electrostatic Discharge; ESD)을 해석하고자 함에 있어서 민감한 반도체 소자 주위에 있는 인체를 주요한 에너지원으로 보는 시도가 제일 먼저 행해졌다. 정전기 해석모델로서는 인체 대전에너지가 반도체 소자로 방전하여 피해를 입히는 경우를 해석하는 인체모델(Human Body Model; HBM)이 있다⁴⁾.

본 논문에서는 ESD 해석을 위해 사용된 인체모델을 바탕으로 화재·폭발을 쉽고, 경제적으로 재현하기 위하여 인체에 대전된 양을 가변화시킬 수 있는 간이형 도구를 대전물체의 물성에 따른 측정, 최소점화에너지 측정 및 거리에 따른 대전물체로부터 대전전압의 측정을 통하여 개발하고자 하였다.

* To whom correspondence should be addressed.
swchoi@kosha.net

2. 인체 모델

2.1. 인체의 전기적 특성

인체가 다른 물체와의 분리·접촉, 특히 마찰(Triboelectricity)에 의하여 대전된 후 반도체 소자 등과 직·간접으로 접촉이 이루어지는 경우 방전이 이루어진다. 방전 시에는 mJ 범위의 에너지가 μs 의 짧은 시간 동안 흘러 반도체 소자의 파괴나 화재·폭발을 일으킨다^{4,6)}.

인체는 전하를 축적할 수 있는 정전용량을 가지며 이는 표면과의 절연상태에 따라 다른 값을 갖는다. 또한, 인체모델에서 인체의 저항치는 근육상태, 습기량, 접촉저항 등에 따라 달라진다. 그러나 인체는 수 μH 정도의 작은 인덕턴스를 갖지만 방전현상에 미치는 영향이 작기 때문에 그 값은 무시된다.

2.2. 표준 인체모델

인체모델의 개발을 위하여 미국 광산국의 실험자료, 전자산업에서의 초기모델로 사용된 Kirk의 시험방법 등 많은 연구가 실시되었으나 인체저항과 인체정전용량의 계산값을 하나로 정확하게 통일시키기 어렵기 때문에 인체모델 또한 일정하게 정해지지 않는다^{4,6)}.

서로 다른 모델을 이용한 실험결과 등을 바탕으로 표준 인체모델을 발표하였는데 인체 정전용량은 100 pF와 저항 1.5 k Ω 의 직렬회로로 하였다. 그러나 이 표준 인체모델은 정확성보다는 일관성 때문에 널리 이용되고 있다.

2.3. 인체의 정전용량 및 저항의 측정법

인체의 정전용량은 인체가 도체이므로 이것과 대지간의 정전용량은 인체 및 대지를 전극으로 하여 교류측정법 및 직류측정법에 의해 측정한다^{7,9)}.

인체의 저항은 IEC TR 60479-1¹⁰⁾의 규정에 따라 인체에 60 Hz의 교류를 인가하는 경우, 인체에는 저항과 리액턴스의 합인 임피던스가 인체의 저항성분이다.

3. 실험 방법

3.1. 고전압 커패시터를 이용한 용량회로의 점화 에너지

Fig. 1은 고전압 커패시터를 이용한 가연성가스·증기와 공기와의 혼합물에서의 최소 점화에너지

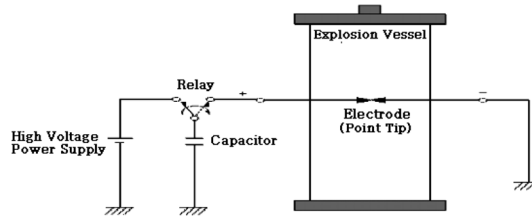


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for MIE measurement using high voltage capacitor.

(Minimum Ignition Energy; MIE)를 측정하는 실험 장치의 구성도를 나타낸 것이다. 이 실험장치는 고전압으로 커패시터에 전하를 충전한 후 이를 방전시키는 점 에너지(Point Energy)를 이용하여 MIE를 측정하는 것으로 고전압/저전류에서는 매우 정확도가 높다는 특징을 가지고 있다. 이 실험장치를 이용하여 인체의 정전용량성과 점화에너지와의 관계를 확인하고자 하였다. 실험에 사용한 커패시터의 용량은 10 pF, 20 pF, 30 pF, 40 pF, 50 pF, 60 pF, 70 pF, 80 pF, 90 pF, 100 pF, 200 pF, 300 pF, 400 pF, 및 500 pF, 인가전압은 최소 0.8 kV에서 최대 6.0 kV까지, 사용 가스는 메탄 : 산소(85 Torr : 165 Torr = 34 Vol.%), 최소점화전압의 측정 순서는 500 pF에서 10 pF로의 낮은 순으로 측정하였다.

3.2. 시료의 종류에 따른 정전용량 및 저항값

인체의 모의대전에 대한 시험방법은 “KS C IEC PAS 62179; 정전기 방전(ESD) 감도 시험-인체 모델⁹⁾”에 의해 측정하는 것이 보편적이다. 이 시험방법은 별도의 고전압 전원 및 인체 등가회로에 필요한 저항 및 커패시터가 필요하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 인체대전 및 방전에 대하여 교육 효과는 높이고 구현장치는 별도의 전원을 필요하지 않도록 마찰전기를 이용한 HBM ESD를 구현시키는 도구개발을 목표로 하여 Table 1과 같은 재료를 이용하여 그 크기 및 두께 등에 따라 정전용량과 저항을 측정하였다. 이 때 실험에 사용한 측정기는 Impedance/Gain-Phase Analyzer (Hewlett Packard, Model; HP4194A)를 이용하였다. Fig. 2는 실험전극, 시편, 측정기의 배치 및 구성도를 나타낸 것이다. 측정시 실험실내의 온·습도는 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\%RH$ 범위이다.

3.3. 시료의 종류에 따른 대전전압

Table 1의 시료를 이용하여 마찰대전시킨 대전판(Charged plate)과 유도판(Induced plate)으로부터의

Table 1. Measurement value of capacitance and resistance concerned with test materials and sizing

측정전극의 직경 (mm)	시료				측정값		측정전극의 직경 (mm)	시료				측정값	
	재질	표기	직경 (mm)	두께 (mm)	정전용량 (pF)	저항 (kΩ)		재질	표기	직경 (mm)	두께 (mm)	정전용량 (pF)	저항 (kΩ)
300	P. C.	#1	100	5	152.17	1.22	150	P. C.	#1	100	5	47.17	27.17
		#2	150	5	140.66	4.21			#2	150	5	46.37	22.46
		#3	200	5	161.21	1.63			#3	200	5	55.82	7.43
		#4	300(1)	5	240.79	2.40			#4	300(1)	5	67.11	12.48
		#5	300(2)	5	260.67	2.81			#5	300(2)	5	75.80	8.85
	P. E.	#1	150	5	148.73	3.32		P. E.	#1	150	5	60.35	9.25
		#2	200	5	163.00	4.24			#2	200	5	57.53	4.89
	Acrylic	#1	100(1)	3	302.99	6.20		Acrylic	#1	100(1)	3	110.37	40.31
		#2	100(2)	5	164.32	3.92			#2	100(2)	5	61.73	7.84
		#3	150	5	193.16	1.59			#3	150	5	90.43	15.30
		#4	200	5	206.52	3.65			#4	200	5	78.07	10.95
		#5	300(1)	5	323.66	1.43			#5	300(1)	5	94.70	8.63
		#6	300(2)	3	648.69	9.89			#6	300(2)	3	177.39	36.16
		#7	300(3)	3	626.70	9.74			#7	300(3)	3	173.16	38.85
200	P. C.	#1	100	5	73.40	3.68	100	P. C.	#1	100	5	29.32	24.53
		#2	150	5	69.50	4.94			#2	150	5	27.94	29.27
		#3	200	5	86.60	1.60			#3	200	5	33.64	26.24
		#4	300(1)	5	110.34	8.25			#4	300(1)	5	35.69	50.76
		#5	300(2)	5	120.96	3.34			#5	300(2)	5	39.71	34.07
	P. E.	#1	150	5	82.95	2.71		P. E.	#1	150	5	30.37	4.16
		#2	200	5	96.15	2.31			#2	200	5	32.76	3.75
	Acrylic	#1	100(1)	3	159.17	19.1		Acrylic	#1	100(1)	3	77.65	80.24
		#2	100(2)	5	89.12	2.63			#2	100(2)	5	42.08	24.76
		#3	150	5	117.05	6.79			#3	150	5	43.24	6.74
		#4	200	5	142.33	4.85			#4	200	5	41.65	8.39
		#5	300(1)	5	152.66	2.04			#5	300(1)	5	49.39	5.77
		#6	300(2)	3	286.85	21.53			#6	300(2)	3	90.02	80.42
		#7	300(3)	3	286.25	22.60			#7	300(3)	3	83.40	82.24

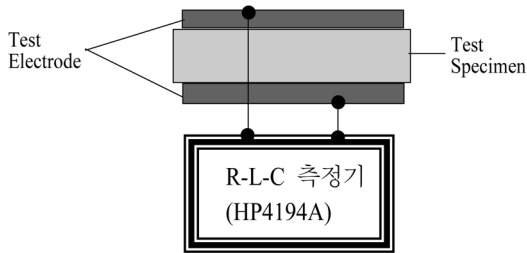


Fig. 2. Measuring arrangement between test electrode and specimen.

거리에 따른 대전전압의 변화를 측정하여 방전에너지를 계산하는데 활용하고자 하였다. 마찰물로 나일론과 옴을 사용하여 마찰시켰다. 대전전압의 측정은 표면전위측정기(春日電機, Model; KSD-0103S)

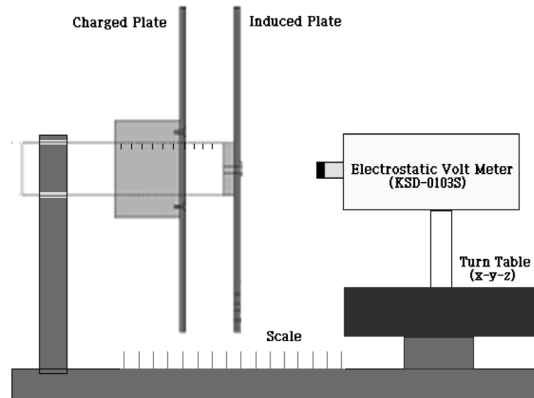


Fig. 3. Experimental set-up to measure of charged voltage measurement from distance of charging circular plate.

를 사용하였다.

Fig. 3은 유도된 대전판으로부터 거리에 따른 대전전압을 측정하기 위한 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 측정시의 실험실내의 온·습도는 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\%RH$ 범위이다. Fig. 4는 대전원판으로 사용된 시료들의 외형 사진을 나타낸 것이다.



Fig. 4. Tested specimens for charging circular plate.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 최소점화에너지

Fig. 5는 고전압 커패시터를 이용하여 최소점화 에너지를 측정한 결과를 나타내 것이다. 측정된 최

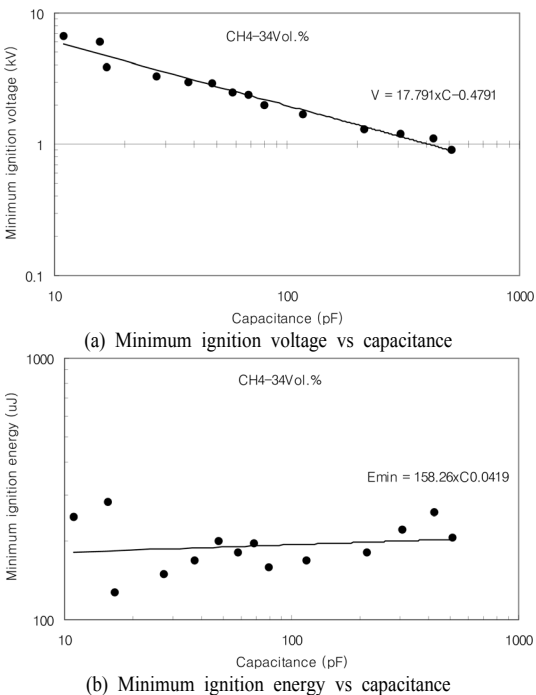


Fig. 5. Minimum ignition voltage and energy versus capacitance in capacitive spark ignition at methane-oxygen mixture.

소 점화에너지(E_{\min})는 보편적으로 이용되는 수식 (1)과 같이 됨을 확인하였다. 또한, 34 Vol.%를 갖는 메탄/산소 중에서의 MIE는 거의 일정한 값(평균 값, 약 170 μJ)으로 측정되었다¹¹⁾.

$$E_{\min} = \frac{1}{2} CV^2(\text{J}) \quad (1)$$

C: Capacitance (F)

V: Charged Boltage (V)

4.2. 정전용량 및 저항값

인체의 정전용량과 유사성을 나타내는 시료는 측정전극과 시료의 직경이 같을 때인 직경이 200 mm, 300 mm인 Poly Ethylene(P.E.)이었다.

4.3. 대전전압

Table 2는 마찰물로 나일론을 사용하였으며, Table 3은 용을 사용하여 마찰시켰을 때의 대전전압이 거리에 따라 변화되는 값을 측정한 결과이다. 측정결과 용으로 마찰하는 것보다 나일론으로 마찰시키는 경우가 대전전압은 높게 나타났으며, 또한 대전판과 유도판의 직경의 크기가 같은 경우보다 대전판의 직경이 작을 때 높은 유도전압이 발생되었다. 이는 대전서열 및 유도전하밀도와 관계된다.

5. 방전 평가용 도구의 개발 및 특성

5.1. 도구의 외형 및 사진

본 연구에서 개발한 간단한 기구를 이용하여 유도대전 현상을 체험할 수 있는 도구(Fig. 6 참조¹²⁾)는 외부로부터의 전원을 필요로 하지 않는(현장에서 전원이 없는 경우), 아크릴제 파이프의 선단에 알루미늄의 원판을 고정하여 중심에 구멍을 낸 Poly Carbonate(P.C.), P.E.는 Acrylic 원판이 파이프에 따라 미끄러지도록 하였다. 비교적 구조를 간단하게 하여 현장 작업자 및 학생의 교육용으로서 이용할 수 있도록 하였다.

또한, 이 도구를 이용하여 인체, 드럼통과 같이 산업설비의 다양한 파라미터에서 쉽게 점화여부를 확인할 수 있도록 하였다.

5.2. 재현 방법

① 먼저 대전 원판의 표면을 나일론 또는 용 등으로 마찰시키면, 대략 Table 2 및 Table 3과 같은 표면전위로 대전된다.

Table 2. Measurement value of charged voltage concerned with test specimen and distance-1(rubbing material; nylon)

유도판 (직경; mm)	재질	P. C.					P. E.		Acrylic						
		구분	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#1	#2	#3	#4	#5	#6
	거리 (cm)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)
300	0	0	-0.4	-2.1	-14.5	-13.6	-10.2	-9.5	0.9	1	1.4	1.2	1.5	3.8	3.1
	1	0	-0.2	-1.9	-12.3	-11.2	-9.1	-8.6	0.8	0.9	1.2	1.1	1.4	3.4	2.9
	2	0.1	0	-1.8	-10.7	-9.8	-8.1	-7.5	0.8	0.8	1.1	1	1.3	3.1	2.6
	3	0.1	0.1	-1.6	-10	-8.5	-7.4	-6.8	0.8	0.7	1	1	1.2	2.8	2.4
	4	0.1	0.2	-1.5	-7.8	-7.3	-6.7	-6.1	0.8	0.7	0.9	0.9	1.1	2.6	2.2
	5	0.2	0.3	-1.4	-6.6	-6.6	-6.1	-5.4	0.8	0.7	0.9	0.9	1	2.4	2
	6	0.2	0.4	-1.3	-5.5	-5.9	-5.6	-4.7	0.8	0.7	0.8	0.8	1	2.2	1.9
	7	0.2	0.5	-1.2	-4.5	-4.8	-5.1	-4.2	0.8	0.7	0.8	0.8	1	2.1	1.8
	8	0.3	0.6	-1.2	-3.5	-4.4	-4.7	-3.6	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9	2	1.6
	9	0.3	0.7	-1.2	-2.9	-3.8	-4.2	-3.3	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9	1.9	1.6
10	0.4	0.7	-1.2	-2.1	-3.3	-3.7	-2.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.9	1.8	1.5	
200	0	-0.2	0	-2.7	-17.8	-16.1	-11.2	-16.7	1.3	1.3	2.4	2.4	2.2	4.9	4
	1	-0.1	0.1	-2.5	-14.1	-13.8	-9.3	-14	1.2	1.2	2.2	2.1	2	4.3	3.6
	2	0	0.3	-2.2	-12.3	-12.1	-8	-11.9	1.1	1.1	2	1.9	1.9	3.9	3.3
	3	0	0.4	-1.9	-10.3	-10	-6.7	-10.9	1	1.1	1.8	1.7	1.7	3.5	3
	4	0.1	0.5	-1.7	-8.7	-8.5	-5.5	-9.1	1	1.1	1.6	1.6	1.5	3.1	2.7
	5	0.1	0.6	-1.6	-7.4	-7.3	-4.5	-7.8	0.9	1	1.5	1.4	1.3	2.7	2.5
	6	0.2	0.7	-1.5	-6.1	-6.3	-3.7	-6.8	0.9	1	1.4	1.3	1.2	2.5	2.3
	7	0.2	0.8	-1.4	-5.8	-5.3	-3	-5.6	0.9	1	1.3	1.2	1.1	2.2	2.1
	8	0.3	0.9	-1.4	-5.3	-4.7	-2.3	-4.9	0.9	1	1.2	1.1	1.1	2.1	2
	9	0.3	1	-1.4	-4.4	-3.9	-1.7	-3.9	0.9	1	1.2	1	1	1.9	1.8
10	0.4	1.1	-1.4	-3.7	-3.1	-1.1	-3.2	0.9	1	1.1	1	1	1.7	1.8	
150	0	-0.8	-0.5	-3.3	-18.8	-17.1	-13.5	-17.7	1.6	1.7	3.1	1.7	3.1	6.2	4.4
	1	-0.5	-0.3	-2.8	-16.1	-15.4	-10.8	-15.5	1.4	1.5	2.6	1.5	2.9	5.4	3.9
	2	-0.4	-0.1	-2.5	-14.3	-13	-9.1	-13.4	1.3	1.4	2.3	1.4	2.7	5	3.6
	3	-0.3	0	-2	-12.3	-11.2	-7.3	-11.6	1.2	1.3	2	1.3	2.5	4.4	3.2
	4	-0.2	0.1	-1.8	-10.7	-9.8	-6	-9.7	1.2	1.2	1.8	1.2	2.3	3.9	2.9
	5	-0.1	0.2	-1.7	-9.3	-8.6	-4.9	-8.6	1.1	1.2	1.6	1.1	2.1	3.6	2.7
	6	0	0.3	-1.6	-8.5	-7.5	-4	-7.5	1.1	1.2	1.5	1.1	2	3.4	2.5
	7	0	0.4	-1.5	-7.8	-7	-3.3	-6.4	1.1	1.2	1.4	1.1	1.9	3.1	2.3
	8	0.1	0.6	-1.5	-6.8	-6.2	-2.6	-5.4	1	1.2	1.3	1	1.8	2.8	2.1
	9	0.1	0.7	-1.5	-6	-5.2	-1.7	-4.8	1	1.2	1.3	1	1.8	2.7	2
10	0.2	0.8	-1.5	-5.4	-4.5	-1.1	-4.1	1	1.2	1.2	1	1.7	2.5	1.9	
100	0	-1.1	-0.6	-4.4	-18.3	-20	-13.6	-16.7	1.8	1.4	3.2	2.7	3.7	7.1	4.5
	1	-0.7	-0.3	-3.9	-16.2	-17.7	-11.7	-14.7	1.6	1.2	2.7	2.4	3.3	6.2	4
	2	-0.6	-0.1	-3.4	-13.6	-14.5	-9.7	-12.6	1.4	1.1	2.5	2.2	3.1	5.7	3.7
	3	-0.4	0	-3.1	-12	-12.4	-7.9	-10.5	1.3	1	2.1	2	2.8	5	3.5
	4	-0.3	0.1	-2.7	-10.6	-11.3	-6.8	-9.8	1.2	1	1.9	1.8	2.5	4.5	3
	5	-0.2	0.2	-2.5	-9.6	-9.8	-5.5	-7.8	1.1	0.9	1.7	1.7	2.3	4.1	2.7
	6	-0.1	0.4	-2.3	-8.6	-8.9	-4.7	-7	1.1	0.9	1.6	1.5	2.1	3.7	2.6
	7	0	0.5	-2.3	-7.8	-8.3	-3.8	-6.1	1	0.9	1.5	1.4	1.9	3.4	2.5
	8	0	0.6	-2.2	-7.1	-7.5	-3.1	-5.2	1	0.9	1.4	1.4	1.8	3.2	2.3
	9	0.1	0.7	-2.2	-6.5	-6.8	-2.4	-4.4	1	0.9	1.4	1.3	1.7	2.9	2.2
10	0.2	0.9	-2.1	-5.8	-6.2	-1.8	-3.7	1	0.9	1.3	1.3	1.7	2.7	2.1	

Table 3. Measurement value of charged voltage concerned with test specimen and distance-2(rubbing material; cotton)

유도판 (직경; mm)	재질 구분 거리 (cm)	P. C.					P. E.		Acrylic						
		#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
		전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)	전압 (kV)
300	0	-0.8	-1.1	-2.9	-10.5	-9.2	-6.9	-8	0.2	0	0.5	0.8	0.7	2.7	1.6
	1	-0.7	-1	-2.6	-9.4	-8	-6.2	-7.4	0.2	0	0.4	0.7	0.6	2.4	1.3
	2	-0.7	-0.9	-2.3	-8.3	-7.2	-5.5	-6.7	0.2	0	0.4	0.7	0.5	2.2	1.2
	3	-0.6	-0.8	-2.1	-7	-6.3	-5	-6.4	0.2	0.1	0.4	0.6	0.5	1.9	1.1
	4	-0.6	-0.7	-1.8	-6.3	-5.8	-4.4	-5.4	0.2	0.1	0.4	0.6	0.5	1.7	0.9
	5	-0.5	-0.6	-1.7	-5.5	-5.1	-4	-4.7	0.2	0.1	0.4	0.5	0.4	1.5	0.8
	6	-0.5	-0.5	-1.5	-4.9	-4.5	-3.6	-4.2	0.2	0.1	0.4	0.5	0.3	1.4	0.7
	7	-0.5	-0.4	-1.3	-4.1	-4	-3.2	-3.7	0.2	0.1	0.4	0.5	0.3	1.2	0.6
	8	-0.5	-0.3	-1.2	-3.7	-3.6	-2.9	-3.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.3	1.1	0.6
	9	-0.4	-0.2	-1.1	-3.2	-3.1	-2.6	-3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.3	1	0.5
10	-0.4	-0.1	-0.9	-2.5	-2.6	-2.3	-2.6	0.2	0.2	0.4	0.4	0.3	0.8	0.4	
200	0	-1.4	-1.8	-3.1	-14.6	-13.6	-9.4	-11	0.2	0.2	0.8	0.7	1.1	4.4	2.1
	1	-1.2	-1.6	-2.7	-12.8	-11.1	-7.5	-9.3	0.2	0.2	0.7	0.6	0.9	3.8	1.7
	2	-1	-1.3	-2.4	-11.3	-9.5	-6.6	-8.1	0.2	0.2	0.6	0.5	0.8	3.1	1.4
	3	-0.9	-1.1	-2.1	-9.1	-7.9	-5.5	-6.9	0.2	0.2	0.5	0.5	0.7	2.6	1.2
	4	-0.8	-0.9	-1.8	-7.6	-7	-4.6	-6	0.2	0.2	0.5	0.4	0.6	2.1	1
	5	-0.7	-0.7	-1.6	-6.8	-6.1	-3.9	-5.3	0.3	0.2	0.5	0.4	0.5	1.8	0.8
	6	-0.6	-0.6	-1.4	-5.5	-5	-3.3	-4.6	0.3	0.2	0.4	0.3	0.4	1.6	0.7
	7	-0.6	-0.5	-1.2	-4.8	-4.4	-2.5	-4.1	0.3	0.2	0.4	0.3	0.4	1.4	0.6
	8	-0.6	-0.4	-1.1	-4.2	-3.7	-2	-3.6	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	1.2	0.5
	9	-0.5	-0.2	-0.9	-3.5	-3.1	-1.6	-3.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	1	0.4
10	-0.5	-0.1	-0.8	-3	-2.4	-1	-2.8	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.8	0.4	
150	0	-1.3	-1.9	-4	-15.7	-15.7	-8.3	-12.4	0.3	0.1	1.2	1.5	1.6	4.3	2.9
	1	-1	-1.7	-3.5	-13.7	-13.4	-5.4	-10.4	0.3	0.1	1	1.2	1.3	3.7	2.5
	2	-0.8	-1.5	-2.9	-11.9	-11.3	-4.6	-9.2	0.3	0.1	0.9	1	1.1	2.9	2.1
	3	-0.7	-1.3	-2.4	-9.6	-9	-2.8	-7.9	0.3	0.1	0.8	0.9	0.9	2.4	1.8
	4	-0.6	-1.1	-2.1	-8.4	-7.9	-2	-6.6	0.3	0.2	0.7	0.8	0.8	1.9	1.5
	5	-0.5	-0.9	-1.8	-7.2	-6.5	-1.3	-5.7	0.3	0.2	0.6	0.7	0.6	1.7	1.3
	6	-0.5	-0.7	-1.6	-6.3	-5.7	-0.4	-5	0.3	0.2	0.5	0.6	0.6	1.5	1.1
	7	-0.4	-0.6	-1.3	-5.4	-4.8	0.2	-4.2	0.3	0.2	0.5	0.5	0.5	1.2	0.9
	8	-0.4	-0.5	-1.1	-4.5	-4	0.7	-3.6	0.3	0.2	0.4	0.5	0.5	1.1	0.8
	9	-0.3	-0.3	-0.9	-3.7	-3.7	1.2	-3.1	0.3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.9	0.7
10	-0.3	-0.2	-0.8	-2.8	-2.8	1.6	-2.6	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.7	0.6	
100	0	-1.4	-2.7	-4.8	-17.5	-16.5	-9.7	-11	0.5	0	1	1	2.3	5.4	2.7
	1	-1	-2.2	-4	-15	-15.7	-6.8	-9.3	0.4	0	0.8	0.8	1.9	4.4	2.2
	2	-0.8	-1.9	-3.5	-13.6	-12.7	-5.3	-8.5	0.4	0	0.7	0.7	1.6	3.9	1.8
	3	-0.6	-1.6	-2.9	-11.5	-11.1	-4	-7.2	0.3	0.1	0.6	0.6	1.3	3.2	1.6
	4	-0.5	-1.3	-2.5	-10.2	-9.7	-2.8	-5.3	0.3	0.1	0.5	0.5	1.1	2.7	1.4
	5	-0.4	-1.1	-2.1	-9	-8.7	-2	-4.4	0.3	0.1	0.5	0.5	1	2.4	1.3
	6	-0.4	-0.9	-1.9	-7.7	-7.9	-1.3	-3.7	0.3	0.1	0.4	0.4	0.9	2.1	1.1
	7	-0.3	-0.8	-1.6	-6.8	-6.9	-0.3	-3	0.2	0.1	0.4	0.4	0.8	1.9	1
	8	-0.3	-0.7	-1.4	-6	-6.2	0.4	-2.6	0.2	0.2	0.4	0.4	0.7	1.7	0.9
	9	-0.3	-0.5	-1.2	-5.3	-5.6	1	-2.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6	1.4	0.8
10	-0.2	-0.4	-1	-4.5	-5	1.4	-1.7	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	1.2	0.8	

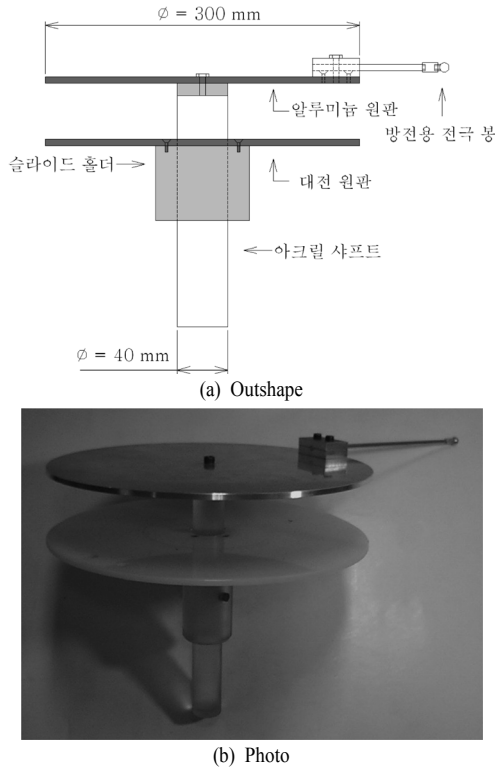


Fig. 6. Outshape and photo of simulation tool.

② 알루미늄 판과의 거리를 변화시키면 양 판간의 거리변화에 따른 표면전위를 알 수 있다. (판 간격이 가까울수록 대전전위는 높아진다)

③ 알루미늄 판의 한쪽에 방전용 전극을 부착하여 유도대전된 알루미늄 판에 접지 금속구를 근접시키면 눈으로 볼 수 있는 발광과 소리를 동반하는 불꽃방전이 발생한다.

④ 이때의 방전에너지 W 는 알루미늄 판의 정전용량 C 및 표면전위 V 로 하여 $W=1/2CV^2$ 에 대입하여 계산할 수 있다.

⑤ 한 번 불꽃방전이 발생하면 대부분의 전하가 방전 시에 소비되기 때문에 알루미늄 판의 표면전위는 거의 0으로 된다. 그러나 대전 원판을 수건으로 문지르거나 두 판을 붙였다 뗐다하면 다시 처음과 같이 알루미늄 판에 대전된다. (반복 사용이 가능하다)

4.3. 재현 결과

Fig. 7은 개발한 도구를 이용하여 인체의 모의 대전된 정전기 에너지에 의한 가솔린으로의 점화를 발생시킨 것을 나타낸 것이다.

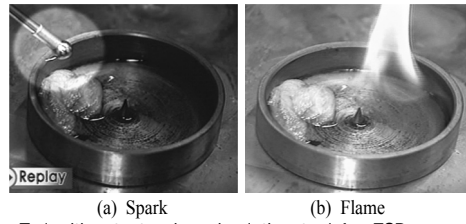


Fig. 7. Ignition test using simulation tool for ESD.

5. 결론

본 논문에서는 ESD 해석을 위해 사용된 인체모델을 바탕으로 산업현장의 관련 작업자 및 학생을 대상으로 화재·폭발을 재현하기 위하여 인체에 대전된 양을 가변화시킬 수 있는 도구를 대전물체의 종류, 크기에 따른 물성 측정, 기초실험 등을 통하여 개발하고자 하였다. 그 결과 아래와 같은 것을 얻을 수 있었다.

- 1) 인체의 정전용량과 유사성을 나타내는 시료는 직경이 200 mm, 300 mm인 P.E.이었다.
- 2) 용으로 마찰하는 것보다 나일론으로 마찰시키는 경우가 대전전압은 높게 나타났다.
- 3) 대전판과 유도판의 직경의 크기가 같은 경우보다 대전판이 작을 때 높은 유도전압이 발생되었다.
- 4) 개발한 도구를 이용하여 모의 대전된 정전기 에너지에 의한 가솔린으로의 점화를 반복·재현하여 발생시킬 수 있었다.

참고문헌

- 1) 산업안전보건연구원, 정전기 방전에너지에 의한 화재·폭발의 실험적 규명, 연구보고서 2006-59-743, p. 11, pp. 21~25, pp. 42~45, 2006.
- 2) 김두현, 김상철 등, 정전기안전, 도서출판 동화기연, pp. 131~136, 2001.
- 3) 중대산업사고 속보, 한국산업안전공단
- 4) 이종호, 김두현 등, “대전인체의 정전기 방전에 대한 동적해석”, 한국산업안전학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 257~262, 1998.
- 5) 김두현, 김상철 등, “대전인체의 방전위험성 평가를 위한 모델 및 예방진단 프로그램 개발”, 한국산업안전학회지, Vol. 13, No. 3, pp. 80~87, 1998.
- 6) 이종호, 김두현 등, “Rompe-Weisel Model에 의한 대전 인체의 정전기 방전 에너지평가”, 한국산업안전학회지, Vol. 18, No. 3, pp. 54~59, 2003.
- 7) 정전기 안전 실무지침, 산업자원부 기술표준원,

- 2004.
- 8) 靜電氣安全指針, 勞働省産業安全研究所, 1988.
 - 9) KS C IEC PAS 62179, 정전기 방전(ESD) 감도 시험 - 인체 모델, 2003.
 - 10) IEC/TS 60479-1 Ed. 4.0 b, Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects, 2005.
 - 11) 大澤 敦, Sang-Won Choi, “新原材料の靜電氣による着火危険の性評價技術に關する研究 - 容量性火花放電の着火限界曲線の検討とパルス自續放電による放電エネルギー制御-”, 産業安全研究所年報, p.53, 2001
 - 12) 理科教育における靜電氣の實驗, 靜電氣學會誌, 第20巻, 第6号, pp. 340~345, 1996.