



Physics Laboratory

Last modified : 2015-08-31

단 학기 실험 7. 전기 마당과 등전위선

실험 목적

정전기, 벌락과 같은 전기 현상을 일으키는 요인을 전하라고 부르며 전하들이 일으키는 대표적인 전기 현상은 전하 사이에 미치는 힘(전기력)이다. 두 전하 사이의 전기력은 전하의 곱에 비례하고 떨어진 거리의 제곱에 반비례하는데 이를 쿨롱(Coulomb)의 법칙이라고 부른다.

서로 떨어진 전하 사이에 미치는 힘을 이해하는데 전기마당이라는 개념을 도입하면 편리하다. 즉, 전하가 있으면 그 주위에는 전기마당이 생기고, 이 전기마당 내에 다른 전하가 있으면 그 전하는 전기마당에 의해 영향(힘)을 받게 된다고 생각한다. 정량적으로는 전기마당은 $(+1 \text{ 쿨롱(C)})$ 의 단위 전하가 받는 힘으로 정의하며, 따라서 전기력과 전기마당 사이에는 비례 관계가 성립하고 비례상수는 힘을 받는 전하의 전하량이다.

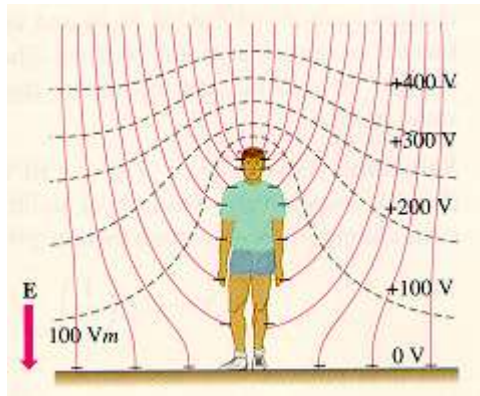
전기력을 받는 전하는 누가 붙잡고 있지 않으면 가속되어(뉴턴의 운동법칙) 점점 운동 에너지가 증가한다. 이 에너지는 어디에서 오는가? 전하의 운동에너지의 증가는 전기마당에 저장되어 있던 (전기)퍼텐셜에너지가 변환된 것이다. 즉, 전하를 다시 원래의 자리로 갖다 놓으려면 바닥에 떨어진 물체를 들어올릴 때와 마찬가지로 우리가 일을 해 주어야만 한다. 두 위치 사이에서 $(+1 \text{ 쿨롱(C)})$ 의 단위 전하를 이동시킬 때 해주어야 하는 최소의 일을 전기 퍼텐셜의 차 또는 전위 차라고 부른다. 여기서 말하는 최소 일의 경우란 전하의 운동에너지를 변화시키지 않고 움직이는 극한을 의미한다. 어느 편리한 한 위

치를 표준 위치로 택하고 그 곳의 전위를 편리한 값(0)으로 약속하면 이 곳과의 전위차가 각 지점에서의 전위 또는 전기 퍼텐셜이 된다.

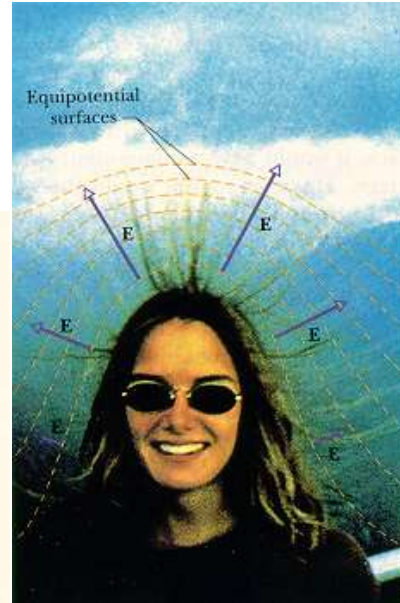
한 전하 또는 여러 전하가 모여 있는 주위의 한 곳에서 어떤 전기 현상이 일어날 것인가는 그 전하(들)에 의해 형성된 전기마당이나 또는 그 지점과 부근에서의 전위를 알면 된다. 원칙적으로는 어떤 전하 분포든지 쿨롱의 법칙과 전기력의 중첩 원리 즉, (벡터)합성 특성을 이용하여 주위의 전기마당을 구할 수 있지만, 점전하 또는 균일하게 분포되어 있는 대칭적인 전하 모임의 경우에는 주위의 전기마당을 손쉽게 구할 수 있는 방법이 있는데 이를 가우스의 법칙이라고 부른다. 그러나 가우스의 법칙은 쿨롱의 법칙을 다시 표현한 것일 뿐 새로운 내용을 담고 있는 것은 아니다.

이 실험에서는 전기를 통하는^[주] 종이 위에 적당한 모양의 두 전극을 놓고, 전극 사이에 전위차를 가한 다음 전극 주위의 등전위점들을 찾고 이를 이어 등전위선을 구한다. 또, 한 점 주위의 전위를 구하여 전기마당을 조사한다. 특히 컴퓨터와 연결시킨 테이블렛 디지털타이저를 사용하여 탐침의 위치 감지를 자동화하고, 또 탐침의 전위를 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 사용하여 컴퓨터로 읽어 표시를 해당 위치의 화면에 그려 줌으로써, 단순히 테이블렛 위에 놓인 전도성 종이 위를 탐침으로 문지르는 것으로 등전위선을 그려낸다. 또한 임의의 점에서의 전기마당 벡터의 계산, 가우스 및 패러데이 법칙의 검증, 데이터의 파일의 저장 및 인쇄, 외부 프로그램을 통한 추가적 데이터 처리 등 다양한 응용이 가능하다.

[주 : 전위 차를 측정하기 위해서 반드시 도체 판이 필요한 것은 아니다. 그러나 이 실험에서와 같이 전압 측정 흐름길을 써서 등전위점을 찾기 위해서는 흐름길로 (아주 작지만) 전류가 흐를 수 있는 도체 판이 필요해진다. 즉, 정상 상태의 전류가 흐르는 도체 판의 전기마당으로 (전극에 분포되어) 정지해 있는 전하에 의한 전기마당을 시늉내는 것이다. 이 측정 방법이 2차원 특성을 가지며 따라서 일반적인 등전위면이 선으로 나타나게 된다.]



(a)



(b)

– E. Hecht 등과 Halliday & Resnick 의 일반물리학 책들에서

실제로 지구상에는 여러 가지 이유로 상당한 크기의 전위 차가 항시 형성되어 있다. 가장 극명한 표시가 번개 현상일 것이다. 그러나 번개까지는 치지 않더라도 간혹 그 존재를 실감할 수 있는 경우가 있다. 이와 같은 경험을 한 적이 있는가?

실험 개요

- 전위 차가 가해진 전극 주위에 등전위점들이 존재하는 것을 확인한다.
 - 평면상에서 등전위점들을 이으면 등전위선이 됨을 이해한다.
- 전극의 모양에 따라 등전위선이 달라지는 것을 조사한다.
 - 등전위선들은 전극의 모양에 어떻게 의존하는가?
- 등전위선과 전기마당 사이의 관계를 공부한다.
 - 등전위선들로부터 전기마당을 어떻게 알아낼 수 있는가?

컴퓨터의 도움을 받아 수행하는 실험을 경험하고, 아울러서 컴퓨터를 통한 데이터 처

리 방법도 익힌다. 등전위선의 모양에서부터 전하에 의한 전기마당의 가우스 법칙, 나아가 전기력에 대한 쿨롱 법칙의 어떤 부분을 유도할 수 있는가 알아보고 이들 법칙을 이해한다.

실험 방법

실험실에는 이 실험을 위해서 다음과 같은 장치가 준비되어 있다. (괄호 안은 준비된 개수)

흑연이 칠해진 전기 전도성 종이 (1)

전극 받침대 (2)

테이블렛 (1)

테이블렛용 펜과 탐침 (1)

직류 전원 장치 (1)

아날로그-디지털 변환기 (1)

입력 단자 대 (1)

컴퓨터

악어 집게가 달린 전선줄 (2)

30 cm 자 (1)

종이 클립 (1)

동전 또는 다른 모양의 전극 재료 (2, 각자 준비)

이외에도 더 필요한 것이 있으면 담당 조교나 실험 준비실(19동 114호)로 문의하거나 각자가 미리 준비하도록 한다. 또, [테이블렛 디지털라이저](#)와 [아날로그-디지털 변환기](#), [컴퓨터 프로그램\(Field Touch\)](#), [정전압 직류 전원 장치](#)에 대해서도 알아놓는다.

이 실험 장치의 특징은 컴퓨터용 테이블렛 디지털라이저와 아날로그-디지털 변환기를 활용하여 등전위선 실험 장치를 반 자동화 시킨 것이다. 여기서 자동화되는 부분은 탐침(펜끝)의 전위와 위치를 측정하는 부분과 검출된 전위 분포를 처리하여 컴퓨터 화면에 나타내는 부분이며, 수동으로 남은 부분은 탐침을 움직이는 부분이다. 이 실험장치는 그림 1 과 같이 전극이 칠해진 전도성 종이(10), 두 전극 사이에 일정 전위 차를 공급하

기 위한 직류 전원 장치(13), 테이블렛(6) 및 펜(7)과 탐침(8), 아날로그-디지털 변환기(2) 및 입력 단자 대(5), 컴퓨터(1)와 측정용 프로그램(Field Touch)으로 구성되어 있다.

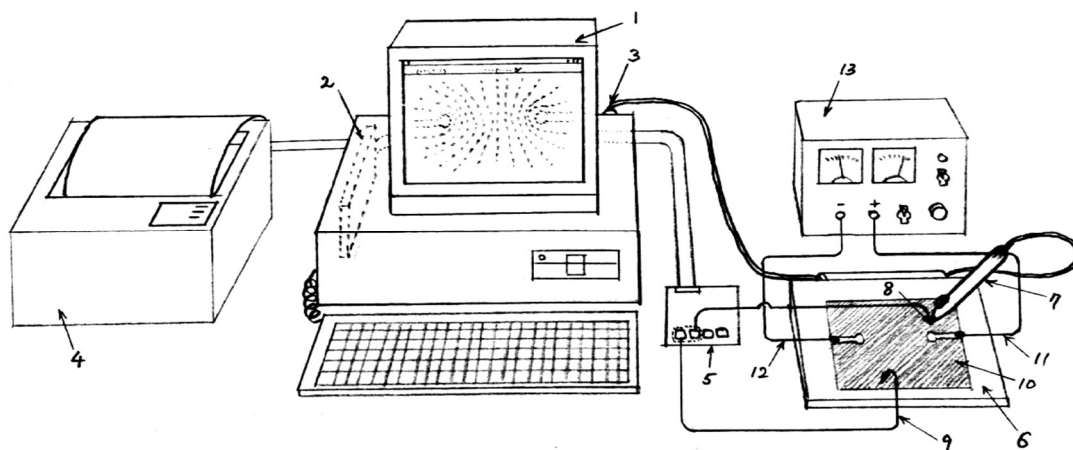


그림 1. 반자동화된 등전위선 실험 장치

전도성 종이는 흑연(colloidal graphite)이 칠해진 종이를 사용한다. 그 위에 필요한 모양과 크기의 전극을 놓을 수 있으며 직류 전원 장치(13)를 이용하여 두 전극 사이에 일정한 전위 차를 가해 준다.

테이블렛(6)은 컴퓨터용 [테이블렛 디지털라이저](#)(ACECAD사 AcecatII 5"x5" Graphics Tablet)를 사용한다. 단, 탐침은 탐침의 평면상의 위치(x,y 좌표)뿐만 아니라 전도성 종이 위에서 전위를 함께 읽을 수 있어야 하므로, 전도성 종이 위의 한 지점에 물린 클립에서 측정된 기준 전위를 전선(9)을 통해 아날로그-디지털 변환기의 입력 단자 대(5)의 접지(ground)단자에 입력하고, 스타일러스 펜(7)의 끝에 부착된 탐침 전극(8)에서 나온 측정 전위를 전선을 통해 변환기의 입력 단자 대(5)의 신호 단자에 연결한다.

아날로그-디지털 변환기(2)는 [컴퓨터 내장형 아날로그-디지털 변환기](#)(ADClone사 ACL-711B Multi-Function Data Acquisition Card)을 사용한다. 사용하는 컴퓨터(1)는 486 사양으로서 결과를 모니터링하고 입출력을 담당한다. . 테이블렛은 PC의 직렬 콘넥터에, 또 아날로그-디지털 변환기는 PC의 확장 슬롯에 연결되어 있다.

등전위선 실험을 반자동으로 수행하기 위해 이 실험에서 사용하는 프로그램인 [Field Touch](#)는 크게는 전위 방식과 전기마당 벡터 방식으로 나눌 수 있으며, 부수적으로 자유 그림 방식도 제공한다. 또한 여러 가지 옵션 설정 및 화면의 저장 기능도 함께 가지고 있다.


권장할 만한 표준적인 실험 방법은 다음과 같다.

1) 흑연이 칠해진 전기 전도성 종이를 한 장 테이블렛 위에 놓고 양면 테이프 등으로 움직이지 않도록 한다. [주 : 이 과정은 먼저 실험반에 의해 이미 되어 있을 수 있다.] 전극으로 동전 두개를 종이 위에 올려놓고 전극 받침대로 눌러서 전기적인 접촉과 함께 전극이 움직이지 않도록 한다.

2) 전극 받침대를 직류 전원 장치에 연결시킨다. [주 : 이때 전극의 극성은 상관이 없다.]

3) 입력 단자 대로부터의 전선에 연결되어 있는 종이 클립을 전기 전도성 종이에 끼운다. [주 : 어느 위치여도 상관없으나 종이 밑 부분에, 수평 위치는 두 전극 사이의 가운데쯤으로 한다.]

4) 전원 장치의 전압 조절 손잡이를 0(시계 바늘이 도는 반대 방향의 끝)에 놓고 전원 스위치를 ON 시킨다. 전원 장치의 전압계가 10 V 정도를 가리키도록 전압 조절 손잡이를 시계 바늘 회전 방향으로 돌려놓는다. [주의 : 전원 장치의 전류 조절 손잡이는 CV

LED 에 불이 완전히 들어올 정도로만 돌린다.]  [\[동영상\]](#)

5) 컴퓨터와 모니터의 전원 여단이를 켜고 Field Touch 프로그램을 실행시킨다. 기본으로 설정된 등간격 등전위선 모드를 사용하여 테이블렛의 펜 몸체의 버튼을 누른 채로 펜 끝을 전기 전도성 종이 위에서 움직이면서 화면상에 등전위선이 기록되는가 살핀다. 이때 설정되어 있는 점의 크기(brush size), 형태(shape), 기준 전위, 전위 차, 오차 폭, 전극(동전)의 위치 등이 적당한가 살피고 여러 가지로 바꿔 보면서 적절한 값을 찾는다.

 [\[동영상\]](#)


6) File 메뉴에서 New를 택하여 그림 영역의 내용을 지우고 새로 등전위선을 그린 다음 Save 시킨다. 이때 등간격의 등전위선을 모두 그리도록 하고 처음 기대한 모양과 일치

하는가 살펴본다.  [\[동영상\]](#)

7) 전극의 간격이나 크기 또는 모양을 바꿔 가면서 등전위선의 형태가 어떻게 달라지는가 살펴본다. 이때 Options 메뉴의 Color Scheme 에서 다른 처리 방법들을 택해 보기도 한다.

8) Drawing Modes 메뉴로부터 Field Vector(전기마당 벡터 모드)를 택한다. 펜 끝을

전기 전도성 종이 위의 한 점에 눌러 화면상에 X 표가 나타나도록 한다. 펜 몸체의 버튼을 누른 채로 X 표 주위를 상하 좌우로 5 mm 이상 썩 가볍게 문질러 준 다음 버튼을

놓아 X 지점에서의 전기마당 벡터가 화면에 표시되는 것을 확인한다.  [\[동영상\]](#)

9) 6)에서 구한 등전위선 상의 여러 점에서 전기마당 벡터를 구한다. 등전위선과 전기마당 사이의 관계를 확인한다.

10) 각 조의 독특한 방법으로 한가지의 실험을 하도록 한다. 즉, 특별한 (그러나 의미 있는) 형태의 전극을 사용하거나, 전기 흐름길에 다른 도체를 놓거나, 전기 흐름길에 부도체를 놓거나(즉, 구멍을 뚫는 것을 의미하며 이때는 각 실험 조마다 매번 도체 판에 구멍을 뚫을 수는 없으므로 미리 구멍이 뚫려 있는 도체 판을 조교의 허락을 받아 사용하도록 한다.), 등전위선과 전기마당 벡터 사이의 관계를 잘 보여주거나 등등을 생각할 수 있다.

실험 결과는 프린터로 출력할 수 있으며 필요하면 디스켓을 함께 제출하여도 된다. 이들 결과는 가우스 법칙, 따라서 쿨롱의 법칙에 의해 기대되는 결과와 일치하는가? 일치한다면 이 실험으로부터 어떤 결론을 내릴 수 있는가? 만약 불일치 한다면 그 이유를 논의하라.

배경 이론

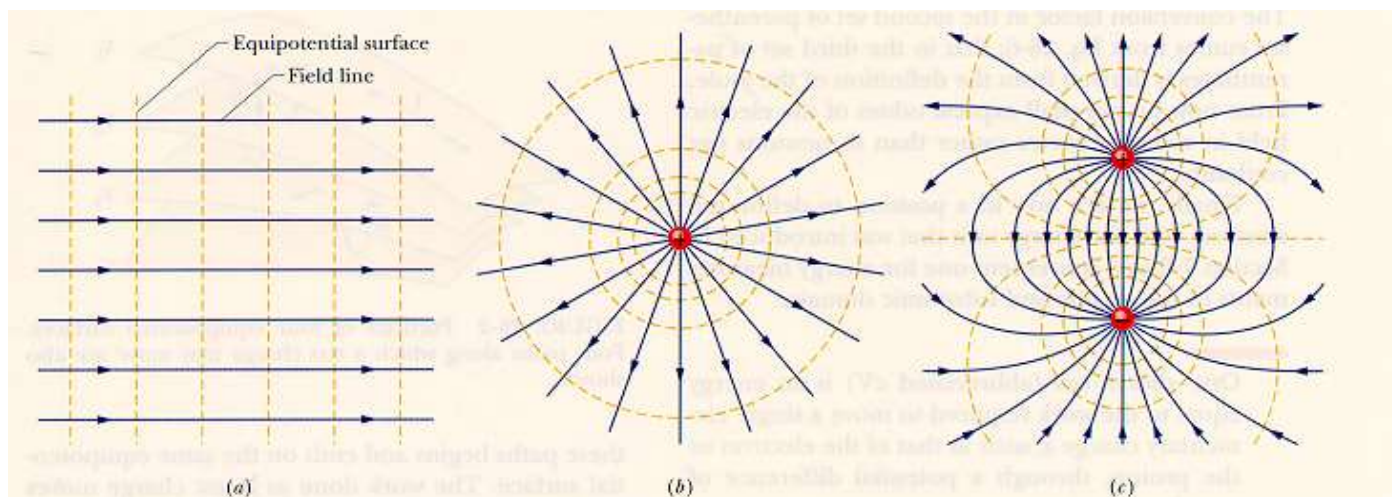
전기마당은 벡터 양이다. 어느 한 곳에서의 전기마당을 $E(V/m)$ 라고 하면 이는 정의에 의해 $+1$ 쿨롱(C)의 전하를 그 곳에 가져왔을 때 전하가 받는 힘(전기력)의 크기가 $E(N/C)$ 이고 방향도 E 의 방향이 된다. 이제 전기마당이 E_1 과 E_2 인 두 지점 사이에 $+1$ C의 전하를 등속도로 옮기는데 드는 일을 전위 차(또는 전기 퍼텐셜 차)라고 정의한다. 전하를 등속도로 옮기기 위해서는 전하가 받는 전기력과 반대 방향으로 같은 크기의 힘을 가해 줘야만 하므로 전위 차는 이 힘이 한 일

$$\Delta U = U_2 - U_1 = - \int_{-r_1}^{-r_2} \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (1)$$

이 되며, 이 전위차는 r_1 에서 r_2 로 전하를 옮기는 경로에는 무관하다.

만약 전기마당이 0 이 아닌 인접한 두 곳에서의 전위가 같다면($U_1 = U_2$), 전기마당과

두 지점간의 변위가 서로 수직($E \perp dr$)인 것을 의미한다. 즉, 등전위의 점들을 이으면 등전위선(또는 면)이 되는데 이 등전위선(면)위의 각 지점에서의 전기마당은 등전위선(또는 면)에 수직이다. 전하(또는 전극)에 의한 각 지점에서의 전기마당 벡터(표시)를 연속적으로 이어 놓은 선을 전기력선이라고 부른다. 따라서 전기력선과 등전위선(면)은 서로 수직으로 교차한다.



(a) 균일한 전기마당의 경우 전기력선은 등간격의 직선이 되고 등전위선(면)은 이에 수직한 등간격의 직선(평면)이다. (b) 점 전하로부터의 전기력선은 방사상의 직선이고 촘촘히 모이는 곳(즉, 전하에 가까운 곳)에서는 전기마당의 크기가 크다. 등전위선(면)은 전하를 중심으로 한 동심원(구면)이며 이때 동심원(구면) 사이의 간격이 갖지 않음에 유의하라. (c) 전하량의 크기가 같고 부호가 반대인 두 전하가 작은 거리만큼 떨어져 있는 경우[주 : 이를 전기 쌍극(자)이라고 부른다.]의 전기력선과 등전위선(면). 서로 다른 등전위선(면)의 전위는 다르며 등전위선(면) 그래프에는 보통 같은 크기의 전위 차를 갖는 선(면)들을 그린다.

쿨롱에 의해서 기술된 두 전하 사이에 미치는 전기력은 두 전하의 곱에 비례하고 전하간의 거리의 제곱에 반비례한다. 이와 같이 거리의 제곱에 반비례하는 힘을 거끌(역) 제곱 힘이라고 부르며 자연현상의 중요한 힘들인 중력, 전기력, 자기력이 모두 이 특성을 가지고 있다. 역제곱 법칙을 따르는 힘의 경우 가우스의 법칙을 적용할 수 있다. 즉, 어떤 임의의 닫힌 곡면을 생각하더라도 그 면의 전기 다발을 구하면 그 값은 간단히 곡면에 의해 둘러싸인 공간 안에 있는 총 전기량에 비례하게 된다. 비례상수를 구하기 위하여 수식으로 표현하면 표면적 S 에 대한 전기 다발은

$$\Phi_e = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

이고, 여기서 dS 는 면적 요소벡터이고 \oint 는 닫힌 (면에 대한) 적분을 의미한다. 쿨롱의 법칙에 따르면 점 전하 q 로 부터 거리 r 만큼 떨어진 곳에서의 전기마당은 그 크기가

$$E = q/(4\pi\epsilon_0 r^2) \quad (3)$$

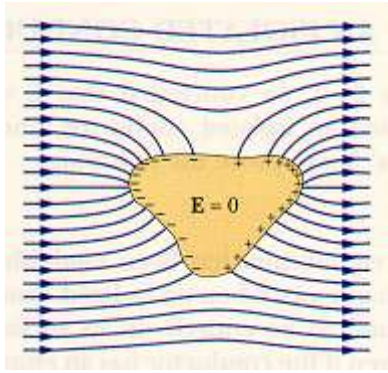
이고 방향은 (+) 전하로부터 멀어지는 방향이므로, 전하를 중심으로 한 반지름 R 인 구면을 닫힌 곡면(가우스 면이라고 부른다.)으로 생각하면 구면 상의 모든 점에서 전기마당의 크기가 같고 방향은 이 구면에 수직이므로

$$\Phi_e = [q/(4\pi\epsilon_0 R^2)][4\pi R^2] = q/\epsilon_0 \quad (4)$$

임을 알 수 있다. 식(4)의 마지막 표현된 관계는 임의의 가우스 면에 대해서도 성립하며 이를 가우스 법칙이라고 부른다. 즉, 임의의 닫힌 곡면에 대한 전기 다발은 곡면 내에 존재하는 (총)전하량을 매질(이 경우는 공기 또는 진공)의 유전상수 $\epsilon_0 (= 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2)$ 으로 나눈 것과 같다. 되풀이 강조하지만 가우스 법칙은 거울 제곱 힘의 특징이다. 즉, 가우스 법칙이 성립하면 그 상호작용이 거리의 역 제곱에 비례하는 것을 의미한다고 할 수 있다.

➤ 도체와 전기마당

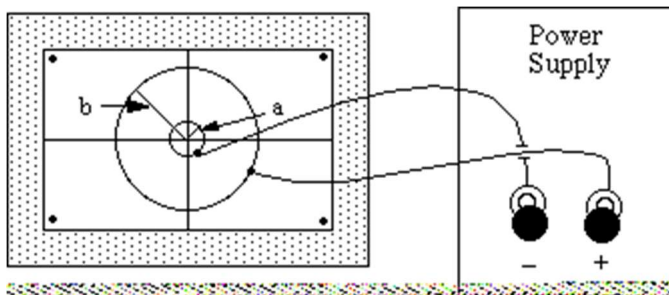
자유로이 움직일 수 있는 전하(전자)가 존재하는 도체 내의 전기마당은 평형 상태에서는 0 이다. 따라서 도체를 대전시키면 추가된 전하는 모두 도체 표면에 분포하고 도체 표면은 등전위면이 된다. 따라서 아래 그림과 같이 평행 전극에 의해 형성된 균일한 전기마당 내에 도체를 놓으면 전기력선과 등전위선(면)이 변화된다. 이때 가우스 법칙으로부터 무엇을 알 수 있는가?



이 실험에서 사용한 정상 전류를 이용한 방법에서는 도체 내부의 전기마당이 0 이 아닙니다. 그러나 도체의 전기 전도도가 흑연이 칠해진 전도성 종이에 비해서 매우 클 때, 근사적으로 같은 경우로 해석할 수 있다.

➤ 두 동심원 전극 사이의 등전위선

이제 아래 그림과 같이 전기 전도성 종이 위에 중심이 일치하는 두 원형 전극을 놓고 그 사이에 전위 차 V_o 를 가하여 일정한 전류 I 를 흘리는 경우를 생각해 보자.



편의상 반지름 a 의 안쪽 전극의 전위를 0 이라고 한다. 중심으로부터 거리 r 만큼 떨어진 곳에서의 전위를 구해 보기로 한다. 이곳에서의 전위 V 는 안쪽 전극과의 전위 차와 같으므로 전도성 종이의 비저항이 균일할 때

$$\frac{V}{V_o} = \frac{\int_a^r \frac{dr}{r}}{\int_a^b \frac{dr}{r}} \quad (A1)$$

로 주어지고, 여기서 b 는 바깥 전극의 안지름이다. 즉,

$$V = V_0 \ln(r/a)/\ln(b/a) \quad (A2)$$

이고, 등전위선은 r 이 일정한 동심원들이므로 알 수 있다. 이를 동심 원통 또는 동심 구 모양의 전하 분포 $+q$ 와 $-q$ 에 의한 전위와 비교해 보아라.