

이격거리가 큰 전극의 공기절연파괴 현상시 발생하는 인자 측정에 관한 연구

A Study on the Measurements of Discharge Parameters in Case of the Switching Impulse Breakdown of a Large Air Spacing

崔 永 旭* · 趙 淵 玉**
(Young-Wook Choi · Yun-Ok Cho)

Abstract - The paper presents the measurement results on the parameters affecting the breakdown mechanism of a large air spacing under switching impulse voltages. Measured parameters are the velocities of leader channels, predischage currents, electric charges injected into the rod-plane air gap and electric field intensities on the plane. For the 3m air gap under switching impulse voltages, the velocities of leader channel have been measured to be of $1\text{cm}/\mu\text{s}$ - $5\text{cm}/\mu\text{s}$, electric field intensity of $2\text{kv}/\text{cm}$, predischage current of $1.2\sim 1.6\text{A}$, the charges injected into the air gap of $11\sim 40\mu\text{C}$ for $400\sim 887\text{kV}$ impulse voltages.

1. 서 론

공기절연 이격거리가 큰 전극에 충격전압을 인가할때의 방전 현상에 대한 물리적 측면에서의 연구는 수 없이 많이 있었다. 연구에 사용된 충격전압은 주로 정극성이었으며 수습에서 수천 μs 의 파두장을 가지고 있었다[1~5].

이러한 연구의 실질적인 목적은 실제 존재하는 공기절연구조의 개폐충격서어지에 대한 절연강도를 충분히 정확하게 미리 결정하는데 있으며 연구의 필요성은 이격거리가 큰 전극의 충격전압 절연강도에 대해서 명확하게 이해하기 어렵기 때문에

생겼다. 실제로, 여자전극(전압을 인가한 전극) 및 접지전극의 구조와 충격전압의 파형 및 파두장은 절연 강도에 영향을 미치는데, 이는 만족스럽게 설명 되지 못하고 있다. 이들 연구는 현재도 진행되고 있으며 완전하게 이들 현상을 이해하기까지는 아직 많은 시간이 필요하다고 생각된다.

그러나 방전에 대한 현재까지의 지식으로도 개폐충격 전압하에서의 전극의 섬락전압을 계산하는 방법들이 제안 되었으며, 그 대표적인 것들은 Lemke모델[6, 7], Jones모델[8], Huzler모델[9], Carrara-Thione모델[10]등이다. 섬락과정에서 가장 뚜렷이 볼 수 있는 것은 도전부(Conducting core)와 주위의 공간전하 기둥(Column)으로 이루어진 리더 채널의 확장이다. 가장 성공적인 물리적 모델을 리더 특성에 기본을 두고있다. 이들 섬락 전압에 대한 물리적 모델에서는 섬락전압을 정확하게 예측하기 위해서는 리더 채널의 진

*正 會 員 : 電氣研究所 高電壓研究室 研究員

**正 會 員 : 電氣研究所 高電壓研究室 室長 · 工博

接 受 日 字 : 1991年 5月 24日

1 次 修 正 : 1991年 9月 28日

2 次 修 正 : 1991年 10月 20日

3 次 修 正 : 1991年 10月 31日

전속도, 전극근처의 표면전계, 전하량, 직경등을 실험을 통해서 알아야 한다. 이러한 관점의 실험 연구도 지금까지 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔다. [11, 12]

이상의 관점에서 본 고에서는 공기절연 파괴기구를 이해하고 섬락전압을 예측하기 위해서는 봉-평판전극에 개폐 충격전압을 인가하고 공기절연 파괴시 리더 채널의 속도를 측정하였으며 공기절연이 파괴되기전의 평균 전극 표면에서의 전계의 세기, 봉-평판 전극에 주입되는 전하량, 선구 방전전류도 측정하였다.

아래에서는 먼저 이격거리가 큰 전극에서의 방전현상을 물리적 측면에서 기술하여 공기절연 파괴 과정에 대한 이해를 돕고자 하였으며, 봉-평판전극의 개폐충격시험 방법 및 실험결과를 기술하였다.

2. 물리적 현상

공기절연 이격거리가 큰 전극에서의 방전 현상에 대한 물리적 설명은 아래와 같다.

전극의 간격이 클 때의 봉-평판 전극에서의 정극성 방전의 진전과정을 영상변환 카메라(image converter camera)로 관찰 된 것은 그림 1.a와 같다. 그림 1.b는 인가전압의 파형이며 그림 1.c는 여자전극의 표면근처에서 측정한 전계강도이다.

전압을 인가하기 시작해서 U_i (코로나 개시전압)에 이르면 코로나가 전압이 인가된 전극 끝에서 보이고(그림 1.a), 전계강도가 현저히 감소한다. (1.c)이 현상이 중지한 후에, 영상변환기로 빛을 측정 할 수 없으며 전계강도는 두번째 코로나가 생길때까지 규칙적으로 증가하는데 이 기간을 1차 암흑기(primary dark period)로 한다. 이 현상은 반복 할 수 있는데, 이 경우 다수의 1차 암흑기가 있게 된다.(그림 1.a)에서는 2개의 암흑기가 있음을 볼 수 있다.) 어떤 순간에 코로나가 짧고, 지금까지의 것보다 훨씬 밝은 채널(리더 기둥)을 수반하는데, 이로부터 1차 암흑기가 끝나고 리더 단계를 시작된다. 이것이 일어나는 시간 T_1 , 전압 U_1 을 각각 리더 개시시간 및 리더 개시 전압이라고 한다. 리더가 첫번째 나타난 후에, 이 현상은 다시 중지 하고 2차 암흑기가 또 다른 코로나가 생길때까지 계속 되는데, 이 코로나에서는 리더의 길이가 증가된 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 단계적 리더를 형성하여 다시 반복 될 수 있으며, 이 경우 다수의 2차 암흑기가 있게 된다. 리더의 채널이 계속 확장되기 시작하면, 2차 암흑기는 끝나고 리더가 연속적으로 진전한

이격거리가 큰 전극의 공기절연파괴 현상시 발생하는 인자 측정에 관한 연구

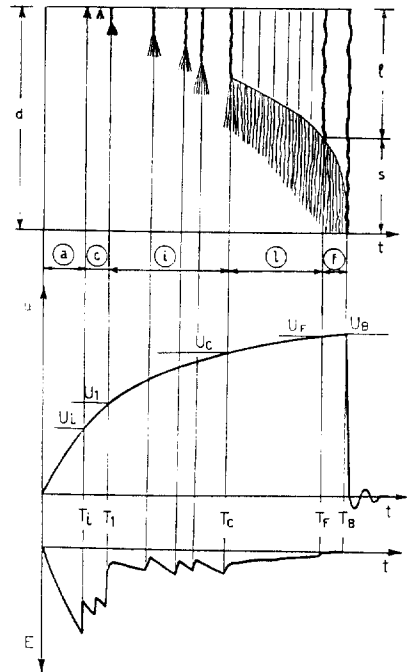


그림 1.a 이격거리 d 인 전극에서의 방전에 대한 영상변환기 사진

- 단계 a : 아무현상도 없음
- c : 코로나, 1차 암흑기
- i : 리더기둥, 2차 암흑기
- l : 리더 연속진전
- f : 절연파괴

Fig. 1a Image converter picture of a discharge on a gap of Length d
 stage a : absence of phenomena
 c : corona, primary dark periods
 i : Leader stem, secondary dark periods
 l : Leader continuous propagation
 f : final jump

그림 1.b t : 시간, U , 전압
 T_i, U_i = 코로나 개시
 T_1, U_1 = 리더 개시
 T_c, U_c = 연속리더 개시
 T_f, U_f = 절연파괴 개시
 T_B, U_B = 절연파괴

Fig. 1b t , time U , voltage
 T_i, U_i = corona inception
 T_1, U_1 = Leader inception
 T_c, U_c = continuous Leader inception
 T_f, U_f = final jump inception
 T_B, U_B = breakdown

그림 1.c 전극 끝에서의 전계강도
 Fig. 1c Electric field strength at the electrode tip.

다. 이러한 현상이 일어나는 시간 T_c , 전압 U_c 는 각각 연속리더 개시 시간 및 연속 리더 개시 전압이라 한다. 리더가 진전 할 동안 리더 선단은 스트리머 지역에 의해 앞장서는데, 이 스트리머 지역의 길이는 리더가 진전 할 동안 약간 증가한다. 스트리머 지역이 평판전극을 도달할 때 (시간 T_r) 리더 선단의 속도는 지수적으로 증가하고, 10내지 $20\mu s$ 이내의 리더 선단은 평판 전극에 도달하여(시간 T_B) 완전한 절연 파괴를 일으킨다.

3. 실험회로 및 방법

실험회로 및 실험 장치는 당 연구소 EHV Hall (가로 \times 세로 \times 높이 : $55 \times 33 \times 25m$)내에서 설치하여 진행되었다. 실험회로는 그림 2.a, 2.b와 같다.

정극성 개폐 충격 전압을 봉-평판전극에 인가하여 절연 파괴 현상을 연구하였고, 전극간의 이격 거리는 $0 \sim 4m$ 까지 조절할 수 있도록 하였으나 $3m$ 이격거리로 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 봉 전극은 길이가 $2m$, 끝부분의 극률반경이 $15cm$ 인 원통형이고 평판 전극은 가로, 세로가 각각 $5.2m$ 인 정방형이다.

리더의 속도 측정은 봉-평판전극에 $887 \sim 1000 KV$ 를 인가하여 절연파괴가 일어날 때 그 불꽃 기둥에서 나오는 빛을 2개의 PMT로서 감지할 수 있도록하여 진행하였다. 그리고 PMT의 위치는 전극아래 $1m$ 이내에서 위치를 바꾸어가면서 실험을 진행하였다.

PMT(HAMAMATSU R106HA)는 수직으로 $5cm$ 간격으로 설치하였고 각각 창문 앞에 2중 슬릿을 설치하여 평판으로 진행되는 리더의 빛을 차례로 감지하여 그 시간차를 분석하여 속도를 측정하였다. 또한 실험 과정중 충격 전압발생기 및 섬락시 전극에서 발생하는 전자기파 장애의 영향이 PMT에 미치는 것을 방지하기 위하여 PMT를 차폐상자안에 설치하였다. 전계 강도는 평판 한 가운데 센서를 설치하여 $300PF$ 의 커패시터를 통하여, 방전전류는 평판 전극 접시선에 C.T를 설치하여, 전하량도 평판으로 흐르는 전류를 $10\mu F$ 의 커패시터를 사용하여 측정하였다.

측정에 사용된 Oscilloscope는 TEK 2430A, $150 MHz$ dual beam이고 코로나의 자세한 관찰을 위하여 Image Intensifier(Night viewing device, Litton M911) 및 Video, still camera를 전극주변에 설치하였다.

평판에 설치한 전계 센서의 구조는 그림3와 같

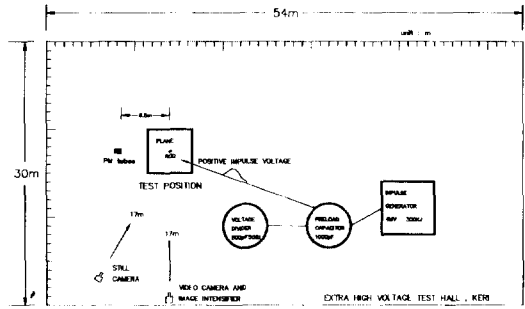


그림 2.a EHV Hall내부의 기기와 실험설비 설치도
Fig. 2.a Arrangement of testing facilities at EHV HALL

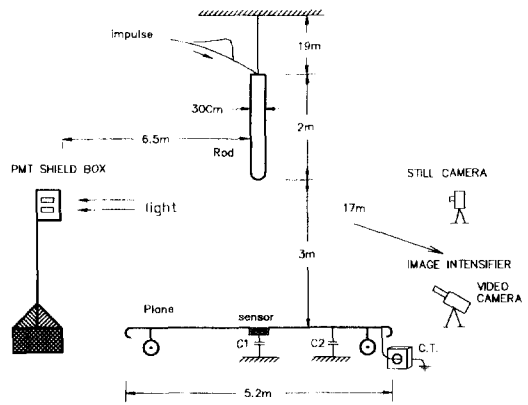


그림 2.b 실험 장치의 배치도
Fig. 2.b Setting drawing of test facilities

- PMT S.B.: PMT Shield Box
- I.I.: Image Intensifier
- S.C.: Still Camera
- V.C.: Video Camera
- C.T.: Current Transformer
- C1(300pF): 전계측정 커패시터
- C2(10 μF): 전하량측정 커패시터

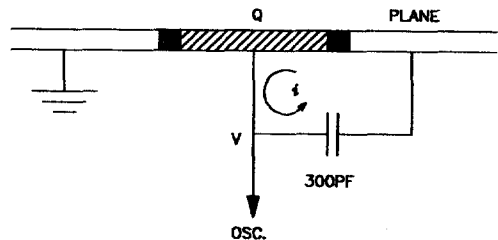


그림 3 전계 측정 센서회로
Fig. 3 Electric field sensor and circuit

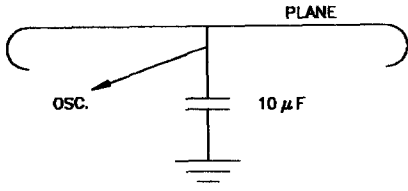
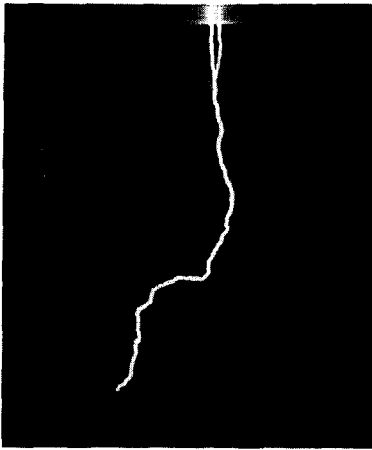


그림 4 전하량 측정 회로
Fig. 4 Measuring circuit of coulomb

고, 봉-평판 전극에 주입된 전하량을 측정하기 위한 센서 구조는 그림4와 같다. 전계 센서의 직경은 12mm, 두께는 0.5mm, 원형동판이며 센서에 유기되는 전계 계산식은 $E = VC/\epsilon A$ 이다. 여기서 V 는 센서에 유기되는 전압이고 ϵ 는 유전률 A 는 단면적이다.

4. 실험결과



간격: 3m
전압: 1000Kv
파형: 180/2500μs
극성: 정극성

그림 5 봉-평판전극 섬락장면
Fig. 5 Figure of Rod-plane flashover

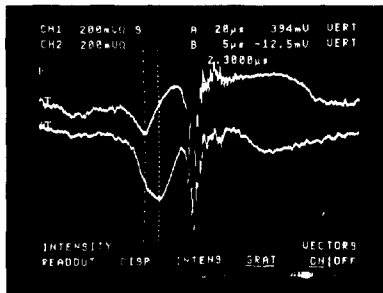
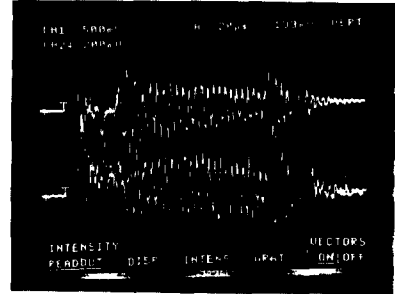


그림 6 2개의 PMT에 감지된 빛 파형
Fig. 6 Output light wave of two PMT's

이격거리가 큰 전극의 공기절연파괴 현상시 발생하는 인자 측정에 관한 연구

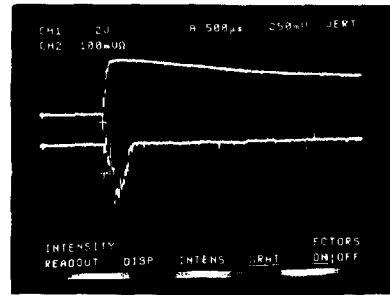
그림 6, 7 및 8은 각각 PMT 출력파형, 전계 센서 출력 및 방전 전류의 파형, 전하 센서의 출력 파형의 일례이다. 이들로부터 리더의 진전속도,



→전계 $E = \frac{CV}{\epsilon_0 A} = \frac{0.7 \times 300 \times 10^{-12}}{\epsilon_0 \times (0.6 \times 10^{-2})^2 \pi} = 2.0KV/cm$
→전류 1.2~1.6A ← (0.3~0.4) × 4

그림 7 전계 센서와 C.T.로 측정된 전계 및 전류 파형

Fig. 7 Measured Electric field, current wave by Electric sensor and current transformer



→전하량 $Q = CV = 10 \times 10^{-6} \times 1.8 = 18(\mu C)$

그림 8 전압 인가에 따라 주입되는 순간 전하량.
Fig. 8 Injected coulomb due to voltage,

표 1 공기절연 파괴 현상시 발생하는 인자들의 측정 결과

Table 1 Measured results of parameters due to air flashover phenomenon.

	측정치	인가전압	측정조건
리더속도	1-5Cm/μs	887-1000kV	전극:봉-평판
전계강도	2kV/Cm	887kV	이격거리:3m
방전전류	1.2-1.6A	887kV	전압파형:
전하량	11-40μC/m	400-887kV	180/2500μs (정극성)

평판전극의 전계, 선구방전전류, 전하량을 측정하였으며 5000회 이상의 실험으로 부터 표1과 같은 결과를 얻었다. 그림 5는 봉-평판 절연파괴 장면이다.

5. 실험결과와 분석

리이더의 속도는 측정때마다 조금씩의 차이가 있고 대체로 속도의 범위는 1~5cm/μs로 파악할 수 있었다. 리이더의 속도가 일정하지 않는 이유는 방전시 리이더의 맨 앞부분은 스트리머로 형성되는데 스트리머는 여러갈래로 진전되면서 뒤따라오는 리이더에 흡수된다. 따라서 리이더의 앞부분은 스트리머 보다는 덜하지만 여러 갈래로 형성되어 있고 방전때마다 방전경로가 다르고 PMT에 감지되는 리이더의 빛출기도 다를 것으로 사료되므로 리이더의 속도는 확률적인 분포로 생각되어 질 수 있다.

전계 강도는 실측치가 봉 전극에 887kV(비 섬락전압)을 인가할 때 평판에서 2kV/Cm였으나 계산결과는 0.53kV/cm로 4배 정도의 차이가 있었다. 이 차이는 전계 계산이 공간 전하의 영향을 무시하고 전극의 기하학적 구조에만 의존하였기

때문에 발생하였다고 생각 된다.

공간전하는 리이더의 선단에 가장 많이 분포된다[3]. 887kV를 인가할 때 Image Intensifier로 관찰할 리이더의 길이는 대략 1m정도이였으므로 40μC/m의 공간전하가 봉전극 끝에서 1m지점에 그림 10과 같이 기동형상으로 몰려있다고 가정하였다. 이 가정하에서 계산한 평판 전극표면에서의 전계의 세기는 1.8kV/Cm이였으므로 공간 전하를 무시한 전계계산치 0.53kV/Cm를 고려하면 실측치와 계산치의 오차가 10%이내에 있음을 알 수 있었다.

이상에서 봉-평판사이의 전계분포는 인가전압보다는 리이더 진전에 따른 공간전하에 의해 더 영향을 받는 것을 알 수 있다.

접지선에 10μF의 콘덴서를 써서 봉 전극에 전압인가시 평판을 통하여 흐르는 전하량은 11~40μC/m(400~887KV)로 측정되었다. 이는 전하량계 산 식 즉

$$q = E \times 2\pi\epsilon_0 r^2$$

에 전극의 조건을 대입하여($r=2m$, $E=2 \times 10^6 V/m$) 계산하면 $q=40\mu C$ 로 계산되어 실측치와 거의 비슷하게 되었음을 확인 할 수 있다.

선구방전전류 i 는 아래와 같다.

$$i = C \frac{dv}{dt} + \frac{dq}{dt}$$

여기에서 C 는 봉-평판전극의 커패시턴스, V 는 인가전압 q 는 전리작용에 의한 공간전하이다. C 는 대략 10pF dv/dt 는 $4.5 \times 10^9 V/sec$ 이므로 $C(dv/dt)$ 는 $4.5 \times 10^{-2} A$ 이다. 리이더의 진전 속도는 평균 3cm/μs이므로 리이더가 그림 10에서 Q 의 위치까지 진전하는데 걸리는 시간은 약 33μs이다. 그러므로 dq/dt 는 약 1.2A이다. 그러므로 선구방전전류 i 의 계산치는 약 1.2A임을 알 수 있으며, 이 값은 실측치 1.2A~1.6A와 거의 같음을 알 수 있다.

6. 결 론

공기 절연 파괴 기구를 이해하기 위해서 봉-평판 전극에 5000회 이상의 180/250μsec개폐 충격 전압을 인가하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 리이더의 속도가 1~5Cm/μs임을 확인하였다. 이것은 외국의 실험결과와 유사하였다[1~5, 10, 11].
- 2) 이격거리가 큰 전극에서의 전계강도의 계산은 공간 전하를 고려해야만 하고, 인가전압이 클

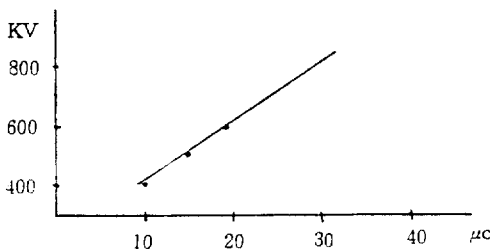


그림 9 전압인가에 따른 전하량의 변화량
Fig. 9 Changing coulomb due to voltage

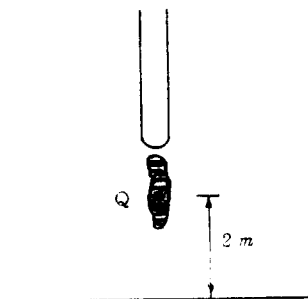


그림 10 공간전하의 위치
Fig. 10 Position of space charge

경우 공간에 주입되는 전하량을 증가시키며 리더의 진전 속도를 다소 증가시키나 평판 부근의 전계 강도의 크기는 거의 일정함을 알 수 있었다.

- 3) 과도 전계 센서를 개발하여 전극 표면 전계를 측정하였으며 측정결과와 계산치의 오차가 10%내에 있음을 알 수 있었다.
- 4) 측정된 리더속도, 평판 전극 표면의 전계의 세기, 선구방전 전류, 전하량은 서로 상관 관계가 있으며 그들 관계를 검토한 결과 측정치들이 수식적으로도 연관되어 의미를 가짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Breakdown phenomena of 5m and 10m rod-plane gap, in air with positive switching impulses. CIGRE 33-15, 1972 Session, pp. 1~11.
- [2] Toshio Suzuki, Kunihiko Miyake Breakdown process of long air gaps with positive switching impulses, IEEE PAS-94 No. 3, 1975, pp. 1021~1033.
- [3] Research on long air gap discharges at Group, paper presented in the name of study committee No. 33, ELECTRA No. 23, 1972. 7., pp. 53~157.
- [4] H. ISA, M. HAYASHI Breakdown phenomena in non-uniform short air gap under impulse voltage. Third international symposium on high voltage engineering, 1979, paper number 51.06
- [5] I.S. Steko'nikov and A.V. Shkilev Development of a long positive spark in the case of an exponential voltage wave front. Soviet physics-DOKLADY Vol. 8, 1964, 2. pp. 825~833.
- [6] E. Lemke. Contribution to the evaluation of the breakdown voltage of long air gaps," Z. Eleltr, Inf Energietechn, 1973, pp. 186~192.
- [7] W.M sch, E. Lemke. A model of the breakdown process in long air spark gaps.
- [8] B. Jones, Switching surges and air insulation. Phil. trans. Roy. Soc., 1973, A275, pp. 165~180.
- [9] B. Hutzler, P. Hutzler-Barre. Leader propagation Model for predetermination of switching surge flashover voltage of large air gaps. IEEE summer meeting 1977.
- [10] G. Carrara, L. Thione Switching surge strength of Large air gaps: physical approach," IEEE PAS-95, 1976, pp. 512~524.
- [11] Chul-Han Oh, Chikasa Uenosono (Kyungpook National Univ., Kyoto Univ.) The Positive Leader Propagation Mechanism Journal of the Korean Physics Society, Vol. 10, No. 2, September, 1977.
- [12] Gilbert G. Hudson and Leonard B. Loeb Streamer Mechanism and Main Stroke in the Filamentary Spark Breakdown in Air as Revealed by Photomultipliers and Fast Oscilloscopic Techniques PHYSICAL REVIEW VOLUME 123, NUMBER 1 JULY 1, 1961.

저 자 소 개



최영욱(崔永旭)

1960년 6월 26일생. 1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 한국전기연구소 입소. 현재 한국전기연구소 고전압연구실 연구원.



조연욱(趙淵玉)

1952년 5월 8일생. 1976년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 일리노이 공대 전기공학과 졸업(석사). 1985년 아이오아주립대 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구소 고전압연구실 실장.