

지하전철 구간의 미세먼지 제거를 위한 전기집진기 개발에 관한 연구

A study on the Electrostatic Precipitator evolution for PM-10 elimination of subway station

노성찬* 김윤호** 김수홍* 이수원*** 유광균***

Rho, Sung-Chan Kim, Yoon-Ho Kim, Soo-Hong Lee, soo-won Yoo, kwang-kiun

ABSTRACT

Electrostatic Precipitators have been used widely in industry, and play an important role in environmental protection. Electrostatic Precipitators(ESP) can be operated with a high collection efficiency and low pressure drop.

Pulse energization is a technique to cope with high resistivity dust, and this results in lower power consumption.

In this paper, Pulse energization ESP to use subway station air clean in subway station, design and test a pulse power supply for ESP

1. 서론

근거리 대중교통 시스템으로 지하철은 40%이상의 교통분담율을 갖는 대표적인 대중교통수단으로 발전하였다. 지하철을 통한 여객의 이동이 많아지면서 점차 지하공간의 환경에 관하여 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한 환경에 관한 법률이 정해지면서 공기의 질을 개선하기 위한 여러 가지 방안들이 마련되고 있다.

지하철의 공간은 크게 선로, 승강장, 대합실로 구성되어있다. 이중 지하철 이용객이 가장 많은 시간을 보내는 곳은 승강장으로 선로와 인접하여 있으며, 열차 진입 시 열차 풍에 의해 터널 내의 오염물질에 노출 될 수 있는 곳이다. 승강장의 공조방식은 터널에서의 분진유입과 열차의 진출입 시 고온의 발열로 인하여 승강장내 공기의 재순환이 불가능하므로 외부공기 유입에 전적으로 의존하는 전외기방식을 도입하고 있다.

대합실은 승강장에 비하여 정온 상태를 유지할 수 있는 공간이다. 일반적으로 공기의 재순환이 필요한 곳으로 신선외기와 순환공기를 혼합하여 공급하는 중앙냉방 방식을 채용하고 있다.

본 논문은 지하철 공기정화장치에 사용할 수 있는 펄스하전방식의 집진 장치의 전원장치를 개발하고자 한다.

* 중앙대학교 박사과정, 비회원

** 중앙대학교 교수, 정회원

*** 한국철도대학 교수, 정회원

2. 전기집진기

전기집진이란 고전압에 의하여 코로나 방전을 발생시켜 가스중의 입자가 대전토록 하여 대전입자를 전기장내에서 전기력에 의해 가스와 분리하는 작용, 즉 입자를 정전기력에 의해 포집하는 것이다.

전기집진기는 방전극, 집진극, 집진실, 가스정류장치, 래핑장치, 하전설비, 애자 및 애자실, 분진배출장치 등으로 이루어져 있다.

전기 집진기의 성능을 나타내는 효율은 집진기에 유입되는 입구분진량에 대한 집진분진량의 백분율로 나타내고 Deutsch식으로 표현되어지며 다음과 같다.

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{A}{Q} \times \omega\right)} \times 100$$

η : 집진 효율

A : 집진 면적(m²)

Q : 집진기를 통과하는 처리가스량(m³/sec)

W : 분진이동속도(cm/sec)

전기집진기내에서 입자에 작용하는 전기력은 대전 입자의 전하에 의한 쿨롱력, 전위경도에 의한 힘, 입자 상호간의 흡인력, 전기풍에 의한 힘 등이라고 알려져 있다. 따라서 전기집진기의 집진 효율을 좌우하는 주요 인자는 위 4가지 힘을 좌우하는 인자가 되며 그 대표적인 것은 입자의 크기, 가스중 입자의 함유량, 입자의 전기적 고유저항, 입자의 성분, 가스의 조성, 가스의 건도와 습도 등이다.

먼지의 속도는 집진기의 성능을 결정하는 중요한 상수로서 일반적으로 0.5~2 [m/s]정도의 범위 내에서 결정해야 한다.

3. 먼지의 전기 비저항

먼지의 전기적 성질은 집진 성능에 직접적인 영향을 미친다. 먼지의 전기 비저항은 전계의 상태에 영향을 준다.

먼지의 전기 비저항에 영향을 주는 요소는 크게 3가지로 볼 수 있다. 첫 번째는 먼지의 구성 성분과 표면의 구조이고, 두 번째는 환경적인 요소로서 먼지가 생성된 환경적인 요소를 말한다. 이는 먼지의 전기 비저항에 중요하게 영향을 미치는 표면구조에 영향을 주게 된다. 세 번째는 압축 방법과 입자의 기하학적 구조이다.

먼지의 전기 비저항에 미치는 환경적인 조건은 한 장소에서 채집된 먼지에서도 표면과 체적의 두 가지 전도를 일반적으로 고려한다. 낮은 온도에서 사용하는 전기 집진기는 표면전도에 의해 전기 비저항이 주로 영향을 받는다. 또 높은 온도에서 사용하는 전기 집진기는 체적전도에 의해서도 전기비저항이 영향을 받는다고 할 수 있다.

모든 절연체의 체적저항은 아래의 표준식에 의해서 결정된다.

$$\rho_v = A_v \epsilon \left(\frac{E_v}{kT} \right)$$

여기서 E_v 는 활성 에너지로 모는 먼지에서 0.6~1.3[eV]의 고정된 값을 갖게 된다.

표면전도는 먼지 표면의 화학적 구성요소와 응집력에 영향을 받는다. 이는 표면저항이 수분에 의해 받는 효과를 보여주는 것과 같다.

$$\rho_s = A_s \epsilon^{-\mu KG}$$

여기서 K와 G는 온도에 의한 함수이다.

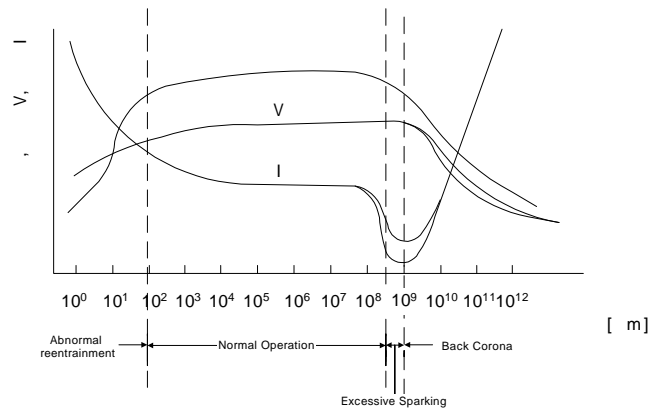
먼지의 전기비저항은 표면저항과 체적저항이 병렬로 연결된 것이라 할 수 있다.

따라서 전체 저항은 다음과 같다.

$$\rho_e = \frac{\rho_s \rho_v}{\rho_s + \rho_v}$$

4. 먼지의 전기 비저항과 집진 효율

전기 집진기의 집진 성능은 먼지의 비저항 ρ_e 에 의해 영향을 받는다. 가스의 온도와 수분함유량, SO_3 와 같은 먼지의 구성요소가 ρ_e 에 영향을 준다. 일반적으로 ρ_e 의 최고치는 $150\sim 200^\circ\text{C}$ 사이에서 나타난다.



[그림 1] 먼지의 전기 비저항에 따른 집진 효율

위 그림에서 $10^2[\Omega\text{m}]$ 부터 $10^8[\Omega\text{m}]$ 까지가 집진 효율이 가장 크게 나타난다.

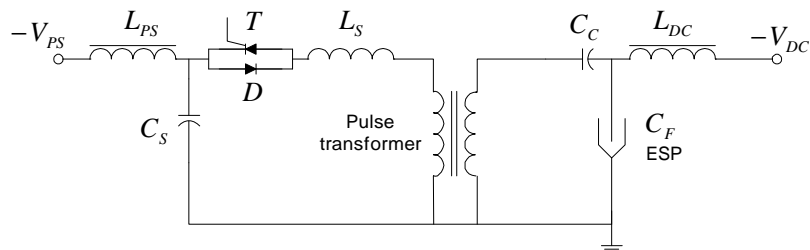
5. 펄스하전 (Pulse Energization)

1980년대 초반에 개발된 산업용 펄스하전시스템은 전기집진기의 하전에 있어 주요한 기술로 발전하였다. 펄스하전 시스템은 전기집진기의 제약중의 하나인 고저항 입자들에 대한 집진 효율을 향상시키기 위해 개발되었다.

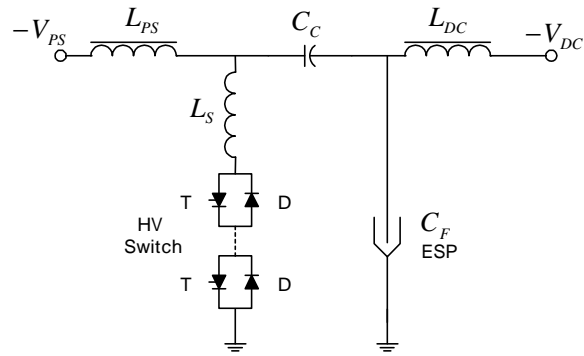
펄스하전은 기저전압위에 짧은 주기를 갖는 고전압 펄스를 중첩시키는 방법으로 1~400 Pulse/s 범위의 특정 주파수에서 반복되어진다. 펄스하전 시스템은 펄스발생회로와 기저전압 전원 공급장치로 구성되어있다.

펄스하전 시스템의 전기장치를 구성하는 방법은 저전압스위칭 방식의 펄스시스템과 고전압 스위칭 방식의 펄스 시스템이 있다.

저전압스위칭 방식의 펄스시스템은 펄스발생과 기저전압을 위한 두 개의 탱크와 제어시스템으로 구성되어 있으며, 고전압스위칭 방식의 펄스시스템은 하나의 고전압 탱크와 제어시스템으로 구성되어 있다.



(a) 저압 스위칭 방식



(b) 고압 스위칭 방식

[그림 2] ESP용 전원장치 종류

고전압 스위칭 방식의 펄스시스템은 V_{DC} 의 기저전압이 전원공급장치로부터 공급되고 펄스발생 회로는 V_{PS} 를 전달하는 전원 공급장치와 저장 커패시터 C_S , 인덕터 L_S 와 전기 집진기 커패시터 C_F 로 구성된 직렬공진회로이다. 펄스가 발생되기 전 C_S 는 $V_{PS} + V_{DC}$ 의 전압으로 충전되고, 전기집진기는 $-V_{DC}$ 로 하전된다. 이때 싸이리스터 T가 turn on 되면 공진이 시작되고 주회로에 전류가 흐르기 시작한다.

펄스 전류와 전압은 다음 식과 같이 흐른다.

$$I_P = \frac{V_{PS}}{\sqrt{\frac{L'_S}{C_{eq}}}}$$

$$V_P = 2V_{PS} \cdot \frac{C_{eq}}{C_F}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L'_S C_{eq}}}$$

여기서

$$C_{eq} = \frac{C_F C_S}{C_F + C_S}$$

5. 지하철 역사의 환기설비

지하철 역사의 환기설비는 자연환기방식과 기계환기방식으로 나눌 수 있다. 자연환기방식은 열차운행시 발생하는 피스톤 효과에 의해 환기하는 방법으로 열차진면에서 발생된 정압에 의해 공기를 외부로 배기하고, 후면부에서 발생하는 부압에 의해 외기가 터널 내로 유입되는 방식이다. 이 방식은 초기 지하철 건설시 주로 고려했던 방법으로 설치비 및 운전비의 부담은 없지만 열차운전 시에만 환기 효과가 있다는 단점이 있다. 따라서 이 방식은 심도가 깊은 지하철에는 적용하기 곤란하고, 열차 이용객의 수가 증가하면 환기량이 절대 부족하여 현재 거의 사용하지 않는 방식이다.

기계환기방식은 환기구에 송풍기를 설치하여 강제로 공기를 유입·배출하는 시스템을 말한다. 이 방식은 역사 전 지점에 고른 환기를 할 수 있고, 역사내의 온도상승을 억제할 수 있는 등 안정된 환기율을 얻을 수 있는 장점이 있다.

지하철의 승강장은 선로에 개방되어 있으므로 열차 진출입시 열차풍과 함께 터널내의 기류가 승강장으로 유입되고, 승강장내의 기류가 유출되는 현상이 반복적으로 발생하는 장소이다. 따라서 열차 진입 시 터널내의 오염된 공기가 열차풍에 의해 승강장으로 유입되고, 열차 진출 시 승강장

내의 공조된 공기가 터널로 유출되는 현상이 발생하여 승강장의 환기를 악화시키고 있다. 따라서 승강장의 공기는 재순환을 실시하지 않고 외부공기 유입에 의존하여 환기하고 있다. 승강장의 천장에서 냉방급기하고 승강장 하부에서 배기하는 시스템을 선택하고 있다.

대합실은 열차풍에 의해 영향을 받지 않고 비교적 정온 상태를 유지할 수 있는 공간적 특성을 갖고 있다. 대합실에서의 일반적인 공조방식은 천장에서 공조급기를 하고, 공급된 공기를 재 순환하여 외기와 혼합하여 순환 공급하는 중앙냉난방 방식을 채용하고 있다.

6. 지하철의 오염물질

현재 지하공간에서 문제가 되고 있는 실내 오염물질은 미세 먼지(PM-10), 질소산화물(NO_x), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 라돈(Rn), 포름알데히드(HCHO), 석면, 휘발성 유기화합물(VOCs), 중금속, 악취 등이다.

지하철 공기오염정도를 측정한 결과 미세 먼지(PM-10)는 $55.86\sim 190.17 [\mu g/m^3]$ 으로 측정되었고, 중금속은 철(Fe)이 과천선에서 $34.68 [\mu g/m^3]$, $46.93 [\mu g/m^3]$ 으로 가장 높은 농도를 보였고, 기타 Cu, Zn, Cr, Ba, Ca, Na등이 나타났다. 기타 유기화합물에서는 벤젠의 농도가 가장 높게 나타났고 기타 톨루엔, 에틸벤젠, m.p-자일렌, O-자일렌 등이 측정되었다.

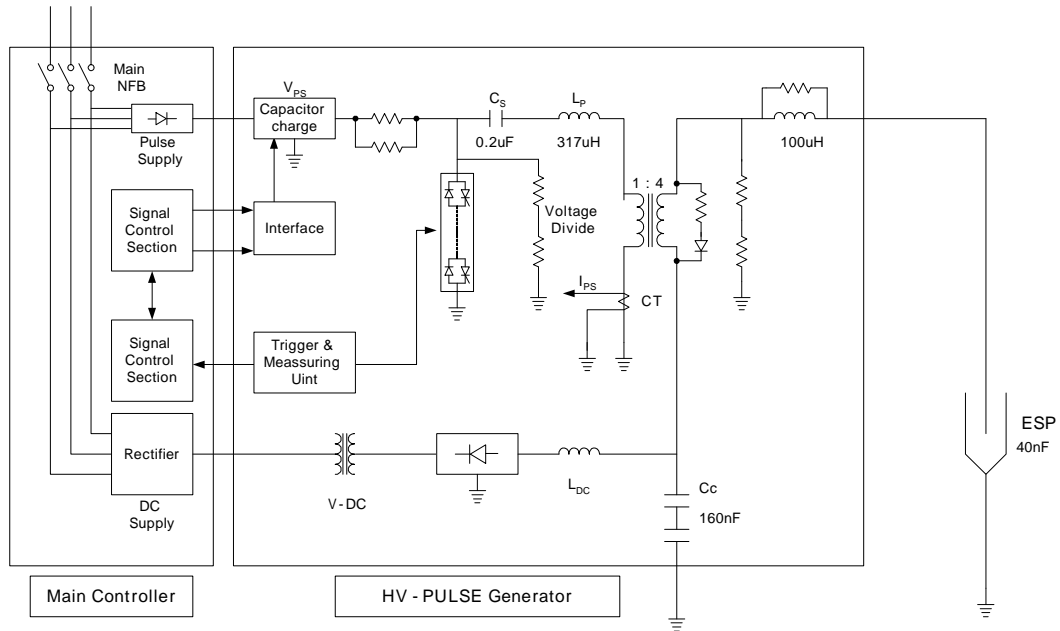
1) 미세 먼지(PM-10)

현재 철도청의 지하역사내에는 패널형 필터를 사용하여 공기를 정화하는 방식을 사용하고 있다. 패널형 필터는 쌓인 먼지의 제거가 원활하지 않고 포집된 먼지가 재 비산되는 경우가 많아 오염된 공기를 처리하는데 한계가 있다. 또한 미세 먼지에 대한 정화가 잘 이루어지지 않아 오염된 공기가 재 순환되는 경우가 발생할 수 있다.

PM-10은 입자의 크기가 $10[\mu m]$ 로 우리 나라에서는 1987년부터 대기환경규제물질로 제정하고 그 농도를 규제하고 있다. PM-10의 발생원인은 다양하게 나타나고 있으나, 일반적으로 화석연료의 연소, 자동차 배출가스, 화학물질의 제조 등으로부터 인위적으로 배출되거나, 대기중의 아황산가스(SO_2), 질소산화물(NO_x), 휘발성 유기화합물(VOCs)등이 광 화학반응이나 응축 등의 과정을 거치면서 생성되기도 한다. PM-10은 발생원에 따라 성분이 다르지만 일반적으로 납, 아연, 수은 등과 같은 중금속과 다환방향족탄화수소(PAH)등의 유기화합물, 다이옥신류, 퓨란류화합물 등 환경호르몬으로 이루어져 있다.

우리 나라의 수원지역에서 측정한 PM-10의 성분분석 결과도 납, 아연, 구리 등과 칼슘, 철, 규소, 알루미늄, 칼륨 등으로 구성되어있다.

7. 마이크로 펄스하전 시스템을 이용한 지하철의 공기정화장치



[그림 4] 제안된 ESP용 전원장치 구성도

본 논문에서 제안하는 지하역사의 공기정화를 위한 전기집진기의 시스템구성은 위 그림과 같다. 본 연구에서는 고전압 스위칭 방식을 채택하여 회로를 구성하였으며, 구성은 3상 교류전원을 승압하여 직류 고전압으로 만드는 펄스직류 전원부와 집진 DC 전원부의 다른 전원을 결합시켜 노이즈 감쇠 및 부하 단락시 전원부를 보호할 수 있는 커플링 리액터와 고전압 스위칭을 하는 반도체 스위치부, 제어에 필요한 고전압 신호원을 감소시켜 제어기로 전송해 주는 각종 측정부로 되어 있다.

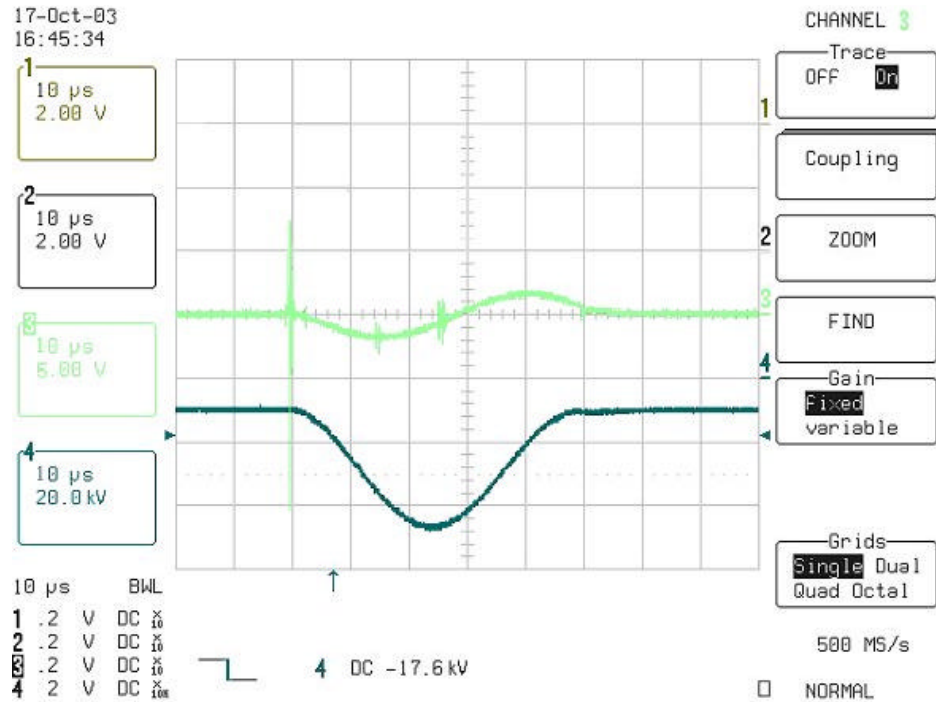
ESP는 집진 전극으로 약 40[nF]의 정전용량을 가지고 있으며, 변압기는 권수비가 1:4 정도의 값을 갖게 하였다.

스위칭 주파수는 50[μS]로 하여 구성하였으며 따라서 공진을 위한 L_p 와 C_s 의 값은 각각 317[μH]와 0.2[μF]으로 하였다.

또한 지하역사의 먼지 특성을 감안, 미세 먼지의 집진 효율을 극대화하기 위하여 ESP의 전압은 40[kV]로 산정 하였다.

아래 그림은 제안한 전기 집진기의 ESP전압과 I_{ps} 전류를 측정한 파형이다.

파형에서 ESP 전압은 40[kV] 트랜스포머 1차측 전류는 251.2[A]의 전류가 흐르고 50[μS]의 공진 주기를 갖는 것을 알 수 있다.



[그림 5] ESP 전압과 변압기 1차측 전류 I_{PS} 파형

8. 결론

본 논문에서는 지하역사에서 사용할 수 있는 펄스하전 시스템을 이용한 전기집진기의 펄스전원을 설계하여 실험하였다.

전기집진기는 고저항의 먼지들을 집진 하는데 용이한 시스템으로 전통적인 직류하전방식의 집진기와 비교하여 다음과 같은 특징들이 있음을 알 수 있었다.

입자의 하전이 용이하고, 높은 집진 전기장을 가지고 있으며, 낮은 전류분포를 가지고 있고, 전류제어능력이 일반적인 직류하전 방식에 비하여 뛰어나다.

또 마이크로 펄스 하전 시스템은 직류하전 방식에 비하여 소비전력이 60%~90% 정도로 적어 에너지 이용효율이 높은 장점을 가지고 있다.

이와 같은 장점을 가지고 있는 펄스하전 시스템을 지하역사의 공기정화 시스템에 채용함으로써 미세 먼지의 집진 효율을 높이고, 각종 오염물질의 집진을 용이하게 하여 지하환경 개선에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

앞으로 이와 같은 펄스하전 시스템의 ESP를 실제로 설치하여 실험함으로써 각종 설치환경에 맞는 시스템을 구현하여 보는 노력이 필요하다.

참고문헌

1. K.R. Parker(1997), Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional
2. 김기훈, 양치용, 박수진, 이연구(2000), 지하전철구간의 오염물질 측정에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제20권 제2호.
3. A Mizuno(2000), Electrostatic Precipitation, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7 No5.
4. K. J. McLean(1988), Electrostatic Precipitation, IEE Proceedings, Vol. 135, Pt. A, No 6
5. 이희관, 김신도(2003), 모델링을 이용한 지하역사내 공기질 관리방안에 관한 연구, 대한환경공학회 2003 추계학술연구발표회,