

터널용 전기집진시스템 개발을 위한 방전극 설계

김 종 루[†], 원 종 응^{*}, 장 춘 만^{**}

(주)에프티이앤이 기술연구소, ^{*}KC코트렐(주), ^{**}한국건설기술연구원

Study on Discharge Electrode Design applied for Road Tunnel

Jong-Ryul Kim[†], Jong-Oung Weon^{*}, Chun-Man Jang^{**}

R & D Center, FT EnE Inc., Seoul 137-819, Korea

^{}KC Cotrell Co., LTD., Seoul 121-817, Korea*

*^{**}Korea Institute of Construction Technology, Hwasung 445-861, Korea*

ABSTRACT: As Social Overhead Capital(SOC) has been expanded, the highway road construction has been accelerated and city road system has been more complicated. So, long road tunnels have been increased and traffic flow rate also has been raised. Accordingly, the exhausting gas of vehicle cars seriously deteriorates the tunnel inside air quality and driving view. In order to improve tunnel inside air quality, it is needed to introduce a compulsory ventilation system as well as natural ventilation mechanism. The former, that is, a special compulsory ventilation facility is very useful and helpful to prevent a tunnel of being contaminated by traffic in most case. In the case of obtaining clearer and longer driving view, the ventilation systems have to be considered in order to remove floating contaminants or exhaust gas from engines. In this paper, discharge electrode design technology will be discussed.

Key words: Tunnel Ventilation(터널환기), Electrostatic Precipitator(ESP, 전기집진기), Electrical Particle Charging(입자 하전), Partical Collection(입자 집진), Discharge Electrode(방전극), Corona Discharge(코로나 방전), Rapping Vibration(입자 탈진), Water Cleaning(수세척)

기 호 설 명	
A : 집진 면적	[m ²]
D : 분진입자 직경	[m]
E_{ff} : 집진장치 집진효율	[%]
E_s : 방전시 자기장	[V/m]
E_{avg} : 평균 자기장	[V/m]
M_c : 단위시간당 유입 입자량	[kg/s]
M_i : 단위시간당 포집된 입자량	[kg/s]

LF : 손실율	[%]
n : 집진셀의 섹션 수	[장]
p : 분진 통과율	[%]
p_c : 순수 분진 통과율	[%]
p_s : 평균 분진 통과율	[%]
RR : 분진 재비산 비율	[%]
SCA : 총 집진면적	[m ²]
SCA_k : 섹션별 집진면적	[m ²]
Sn : 바이패스 분진 비율	
\bar{V} : 평균 유속	[m/s]
W : 유입 유속	[m/s]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-523-0543; fax: +82-2-523-0544

E-mail address: jrkim@ftene.com

그리스문자

- ε : flue가스 계수
 n : 가스 점성계수 [kg/m·s]

1. 서론

우리나라의 최근 국내에서는 SOC 사업이 본격화 되면서 고속도로망 및 도시교통망 확충이 가속화 되어 터널의 수량이 증가하고 터널의 장대(長大)화도 급속히 이루어지고 있다. 또한 차량의 급속한 증가에 따른 통행량의 팽창으로 차량 배기가스로 인한 터널내부의 환경 악화가 예상된다.

터널의 환기방식은 크게 자연환기 방식과 강제환기 방식으로 나뉘며 터널길이가 짧은 경우 자연환기방식이 적용될 수 있으나, 터널길이가 상대적으로 긴 장대터널의 경우 강제환기 방식이 적용되어야만 터널 내부의 공기환경을 유지시킬 수 있다. 선진외국에서는 오래전부터 터널 환기 대책에 대해 지대한 관심을 가져왔고, 그중에서도 일본과 유럽은 지형적 특수성으로 인하여 도로터널의 건설을 활발히 추진하면서 환기설비 역시 중요한 문제로 판단하여 이에 대한 투자를 한 결과 높은 수준의 기술개발을 이루어왔다. 특히, 최근 들어 국민의식 수준 향상에 따라 환경에 대한 중요성이 크게 부각되고 안정운행에 대한 중요성이 강조되고 있어 터널 내에서의 가시거리 확보를 통한 주행성 증대를 위해 터널 내부에 발생하는 부유분진, 매연 등을 제거할 수 있는 전기집진시스템에 대한 관심이 증가하고 있으며, 실제 터널에 설치되고 있다.

일본 및 유럽 선진국에서는 터널환기시스템으로 강제환기방식 중에서 가장 경제적이고 친환경 전기집진 환기시스템을 실용화하여 가동하고 있으나, 국내에서 적용되고 있는 시스템은 일본 또는 유럽(노르웨이)에서 일체를 수입하여 적용하는 것이 현실이다. 그러므로 이러한 외국의 설계기준 및 설계기술에 대한 완전한 의존경향에서 탈피하여 타당성 검토 및 적용가능성 여부의 구체적인 설계기술을 확립하고 최적설계에 대한 기술적인 노하우를 획득하여 우수한 국산품의 개발이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 우리 실정에 맞는 한국형 터널

용 전기집진시스템을 국산화하기 위해 주요 구성부분 중 핵심 요소인 전기집진기 개발을 위하여 집진셀 및 방전극 제작에 대한 연구내용을 정리하였다.

2. 전기집진기 셀 설계 및 제작

2.1 기본 원리

전기집진 방법은 실제적으로 많은 방식과 형태를 가지고 있지만 모든 전기집진기들은 근본적으로 다음과 같은 세 가지 과정에 근거하고 있다.

(1) 입자의 하전(Electrical Particle Charging) 현상은 마찰이나 우주 복사선과 같은 자연적인 현상에 의해 입자가 생성되는 과정 중에도 발생할 수 있으나, 이러한 자연적인 현상에 의해 입자상에 쌓이는 전하량은 극히 미세하므로 전기집진을 위해서는 인공적인 방법을 통하여 입자를 대량 하전 시키는데 이에 사용되는 것이 고전압 코로나(Corona)이다.

(2) 입자의 집진(Particle Collection)은 코로나 방전시 방출되는 전자는 충돌에 의해 부유입자에 부착되어 이를 (-)로 극성화 하고, 대전된 부유입자는 전기력장에 의해 (+) 또는 접지되어 있는 집진극에 부착된다. 전기적으로 하전된 입자가 전기장(Electric Filed) 내에 놓이게 되면 정전기력(Static Electricity Force) 을 받게 되어 하전된 음이온과는 반대 극성 전극(Collecting Electrode)으로 당겨지는 원리이다.

(3) 입자의 탈진(Rapping, Vibration)은 집진극에 도달한 입자들은 집진판에 쌓이게 되고 탄탄한 먼지층을 형성하게 되므로 타격(Rapping), 진동(Vibration), 세척(Water Cleaning) 등의 방법으로 집진된 먼지들을 집진 전극에서 분리 처리한다.

Fig. 1은 전기집진기의 원리를 나타낸 것으로 전기집진기가 성공적으로 작동하려면 가능한 많은 양의 기체이온이 공급되므로 오염입자가 충분히 대전 될 수 있도록 설계·제작되어야 한다. 기체이온들이 형성되는 메카니즘은 몇 가지가 있지만 전기집진기에서는 코로나에 의한 방전만이 유효하다.

2.2 집진셀 설계

본 연구에서는 기본적으로 수학적 접근은 효율에 관한 해법으로 출발하였다. 일반적으로 집진장치의 집진효율(또는 포집효율) E_{ff} 는 단위시간당 장치에 유입된 입자량 M_i [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]에 대한, 포집된 입자량 M_c [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]의 비율을 백분율로 나타낼 수 있다.

$$E_{ff} = \frac{M_c}{M_i} \times 100 [\%]$$

M_i , M_c 를 순시 값이 아니라, 그 시간까지의 전체량으로 나타내면, 얻어진 E_{ff} 는 적산포집효율로 나타낼 수 있지만, 집진효율이 시간에 따라 변하지 않는 경우에는 순간포집효율과 적산포집효율은 일치하게 된다.

또한 집진효율은 집진장치의 구조와 운전조건에 좌우되므로 시스템적 특징을 고려하여 효율을 구하려 할 때는 집진면적과 풍량의 비에 의한 집진효율의 기본방정식인 Deutsch-Anderson 방정식을 도입할 필요가 있다.

$$E_{ff} = 1 - e^{-\left(\frac{A}{V} \cdot w\right)}$$

실제 집진기 설계에는 상기의 식이 적용되므로 이방정식에서 가정하고 있는 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 집진기내의 공기의 진행방향에 수직인 임의의 단면에 있어서 분진입자는 항상 균일하게 분포되어 있다.
- 집진전극 가까이의 경계층을 제외하고 공기의 평균유속은 균일하며 일정하다.
집진전극 가까이의 분진입자 이동속도는 일정하고 가스의 평균유속보다 작다.
- 전기집진기내의 이상현상인 입자의 재비산, 역전리, 입자의 응집, 코로나의 불균일, ion풍에 의한 가스흐름의 흠어짐 등이 존재하지 않는다.
- 분진입자의 입자경은 모두 동일하다.

전기집진기의 기본설계는 산업용 기본 설계 프로그램을 활용하며, 시스템적 측면의 효율이 고려되므로 기본적으로 Deutsch-Anderson을 이용하게 되며 재비산(RR)과 집진영역을 통과하지 않는 분진(Sn)에 대한 영향을 고려하여 집진면적을 구하는 프로그램의 계산순서는 다음과 같다.

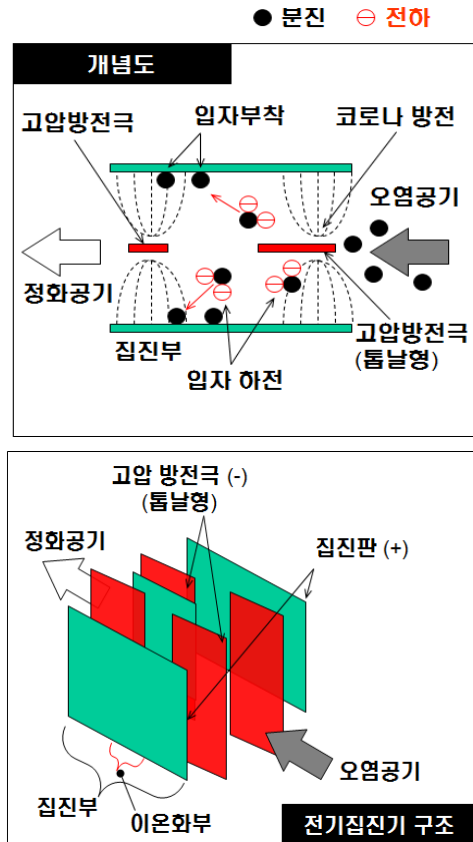


Fig. 1 Structure and conception of electric precipitator

- STEP 1 : 설계조건인 ESP의 입구와 출구의 농도로부터 효율 산정: E_{ff} (%)
 - STEP 2 분진 통과율 계산
- $$p = 1 - \left(\frac{E_{ff}}{100}\right)$$
- STEP 3 ESP 운전온도
 - STEP 4 Back corona 발생여부
 - STEP 5 ESP 입구측의 분진직경
 - STEP 6 통과분진 및 재비산 계수
 - STEP 7 가장 잘 통과하는 분진 및 비산되는 분진직경을 선정
 - STEP 8 분진을 제외한 flue 가스의 계수 계산

$$\varepsilon = 8.845 \times 10^{-12}$$

$$\eta = 1.72 \times 10^{-15} \left(\frac{T}{237}\right)^{0.71}$$

$$E_s = 6.3 \times 10^5 \left(\frac{237}{T}\right)^{1.65}$$

$$LF = Sn + PP(1 - Sn)$$

$$E_{avg} = \frac{Es}{1.75} \text{ (no back corona available)}$$

$$= 0.75 \times \frac{Es}{1.75} \text{ (back corona available)}$$

- STEP 9 section 수 n 결정
 $LF^n < p$ 을 만족하는 최소값
- STEP 10 section의 평균 분진 통과율 계산

$$p_s = p^{1/n}$$

- STEP 11 손실항을 제외한 순수한 분진 통과율

$$p_c = \frac{p_s - LF}{1 - LF}$$

- STEP 12 분진경 변경 factor 계산

$$D = p_s \cdot MMD_p$$

$$= \frac{RR(1 - S_n)(1 - p_c) \cdot MMD_r}{D}$$

- STEP 13 각 section의 분진 입자경 계산

$$MMD_1 = MMD_i$$

$$MMD_k = MMD_{rp} + \frac{MMD_{k-1} \times S_n}{D} + \frac{[(1 - p_c) \times MMD_p] \times p_c}{D} + \frac{[p_c \times MMD_{k-1}] \times p_c}{D}$$

- STEP 14 각 section의 집진면적 계산

$$SCA_k = \frac{-\left(\frac{\eta}{\varepsilon}\right) \times (1 - S_n) \times \ln(p_c)}{(E_{avg}^2 \times MMD_k \times 10^{-6})}$$

- STEP 15 총 집진면적 계산

$$SCA = \sum_{k=1}^n SCA_k$$

이상과 같이 집진용 셀 계산과정을 Fig 2에 나타낸다.

2.3 방전극 개발

기본 설계방법을 바탕으로 최종 설계, 제작된 집진기는 7.5CMS를 기준으로 제작하였다.. 최종 설계에서는 기본 설계에서 구한 집진면적에 고전압 인가부의 절연거리 등을 고려하여 실제 제작되었다. 전기집진기의 방전극과 집진판은 두께 0.4mm STS304 평판을 사용하였고, 방전극과 집

전극 사이의 극간거리는 15mm를 유지하도록 설계하였다.

Fig. 3~Fig. 4는 본 연구과제에서 설계, 제작한 집진기의 설계도면과 사진들이다. 본 과제의 실증 시험에 앞서 시행된 Pilot 실험 과정을 통하여 얻은 기술적 Know-how를 기반으로 제진 효율을 향상시키는 방안이 검토되었다. 전기집진기는 크게 2가지 타입으로 타입 A(912Wx 416H x568D)와 타입 B(912Wx 416H x268D)로 설계하였다.

일반 전기집진기의 경우 제진 과정에서 가장 핵심적인 부분인 코로나 방전(Corona Discharge) 효과를 극대화하기 위하여 방전극에 많은 Edge부를 형성시킨다. 이러한 Edge부에서는 전자 사태가 가장 먼저 일어나게 되고 이를 통해 분진의

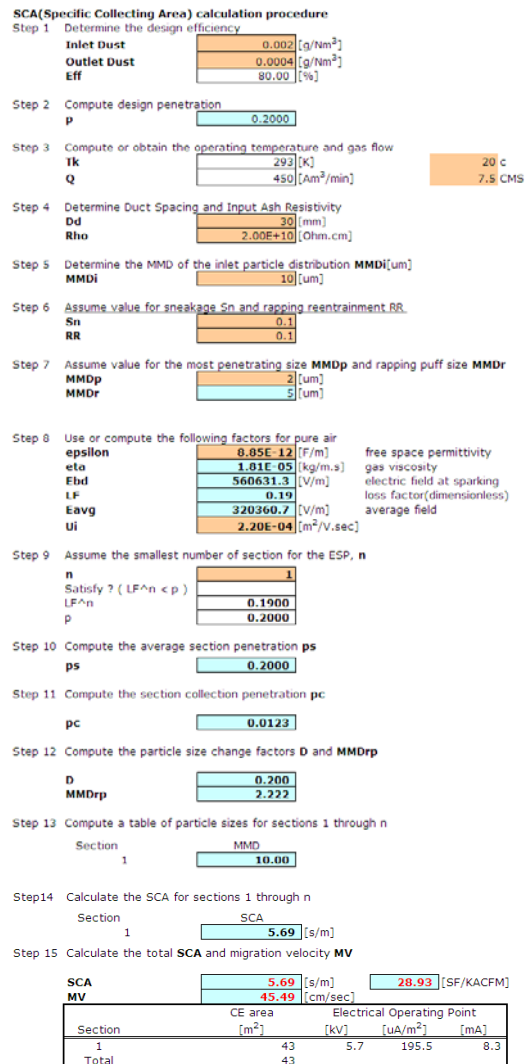


Fig. 2 Design of electric precipitator

대전 효율이 높아지게 된다. 이와 같은 개념으로 Pilot 실험시 사용했던 방전극 형상을 바꾸어 Test를 시행하였으며 변경된 방전극 형상은 다음 Fig. 5와 같다.

본 연구에 채용된 전기집진방식은 1 단식으로 집진부와 방전부가 같은 영역내에 있으며 집진과 방전이 동시, 동일 공간에서 이루어지는 특징을 가진다. 반면 외국 기술은 방전부와 집진부가 분리된 2 단식 구조이며 2가지 방식을 비교하면 다음과 같다.

Table 1 Comparison of EP mechanism

	2 단식 (외국 기술)	1 단식 (개발 기술)
특징	<ul style="list-style-type: none"> ■ 집진부와 방전부가 분리 ■ 2개의 별도 하전 장치 필요 ■ 집진극간 거리 30 mm 이하 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 집진부와 방전부가 공통 공간 ■ 단일 하전 (음코로나) ■ 집진극간 거리 30 mm 이하
장, 단점	<ul style="list-style-type: none"> ■ 방전 용량 증가를 위해 방전부의 별도 공간 증가 ■ 집진 효율 증대를 위한 별도의 전원 공급 장치 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 동일 집진 면적으로 설계 가능 (단일 블록화 가능) ■ 단일 하전으로 운전 용이

전기집진에 있어 동일 집진 면적을 가진 설비라면 코로나 방전 효율에 따라 집진 효율에 차이가 나게 되며, 외국 기술 역시 이러한 효과를 달성하기 위해 고유한 방전극 형상을 개발하여 적용하고 있다. 개발된 전기집진 셀에 장착된 방전극은 KC코트렐(주)가 35 년간 쌓아온 전기집진기 설계, 제작 및 시공 경험을 바탕으로 새로이 설계 제작된 형태로 방전극의 핵심인 코로나 방전이 평판형 방전극 전면에서 발생하도록 설계된 것으로 전기집진의 가장 중요한 요소인 코로나 방전이 일어나는 지점의 수량을 극대화시켰으며 집진기 입구에서부터 출구에 이르기까지 지속적으로 방전이 일어나게 한 것이다. 최종 개발된 방전극 형상을 적용하게 됨으로써 전기집진 셀의 집진 효율을 동일 집진 면적 대비 5 % 이상 증가시키는 결과를 확인하였으며 형상 및 코로나 방전 효과를 Fig. 6에 나타낸다. 본 연구에서 개발된 전기집진셀은 고유속(7 m/sec이상) 조건으로 고유속 흐름에서의 집진과 제진 과정에서의 재비산의 방지가 가장 핵심적인 요소이다. 이를 해결하기 위해 집진극간 거리의 최적화 검토가 진행되었으며, 극간 거리 30 mm가 최종 확정되었다. 이 거리는 설계 조건에 따라 다소 유동적

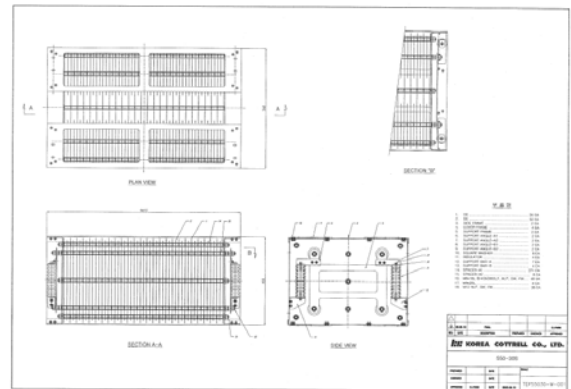


Fig. 3 Discharge electrode (Type A)

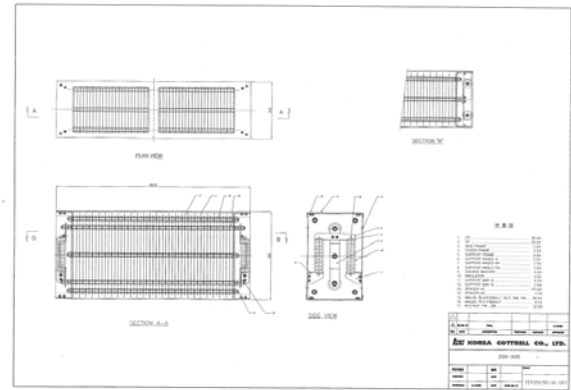


Fig. 4 Discharge electrode (Type B)

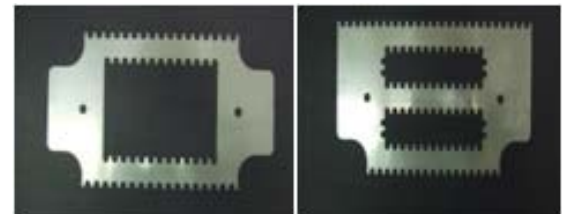


Fig. 5 The unique shape of discharge electrode

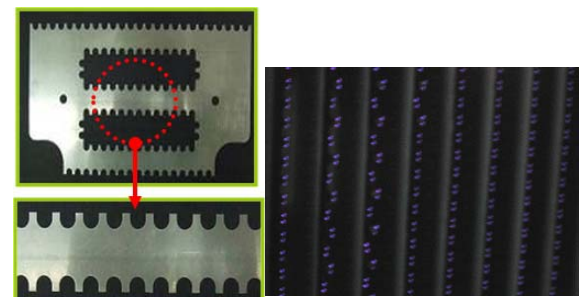


Fig. 6 The unique shape of discharge electrode and Corona discharge

인 요소가 있으나 터널내 환경이라는 독특한 여건에서의 최대 열악 조건을 산정할 경우 이 거리는 대부분의 경우 유효하며 특히, 최적 방전 특성을 감안한 제진 효율 측면에서 30 mm 간격은

Table 2 Performance test of ESP (Proto type)

집진 면적 (m ²)	유속 (m/sec)		분진 농도 (mg/m ³)		분진 제거 효율	풍량 (Am ³ /sec)	구 성	비 고
	DUCT	EP 내부	입구	출구				
44	5.5	6.1	0.088	0.014	84.2%	3.74	11 m ² (550L) x 4	
	6.8	7.5	0.077	0.018	76.8%	4.624		
	7.9	8.7	0.099	0.028	71.5%	5.372		
22	6.8	7.5	0.191	0.068	64.6%	4.624	11 m ² (550L) x 2	

Table 3 Performance test of ESP (Modified type)

집진 면적 (m ²)	유속 (m/sec)		분진 농도 (mg/m ³)		분진 제거 효율	풍량 (Am ³ /sec)	구 성	비 고
	DUCT	EP 내부	입구	출구				
22	5.5	6.1	0.170	0.042	75.3%	3.74	11m ² (550L) x 2	550L의 CE,DE 개조
	6.8	7.5	0.160	0.048	70.0%	4.624		
	7.9	8.7	0.138	0.052	62.3%	5.372		
32	5.5	6.1	0.147	0.025	83.0%	3.74	11+5m ² (550L+250L) x 2	550L의 CE,DE 개조
	6.8	7.5	0.142	0.032	77.5%	4.624		
	7.9	8.7	0.165	0.042	74.5%	5.372		

거의 변화가 없을 것이다. Fig. 3은 설계된 집진 셀을 나타낸다.

3. 성능시험 및 결과

이상과 같이 설계 및 제작된 전기집진기 셀에 대하여 실제 성능 발휘를 확인하기 위하여 셀성능시험을 수행하였으며 그 결과를 Table 2~3에 나타내었으며 이상의 실험을 정리하면 다음과 같다.

- ① 방전극 시험 결과 방전극의 집진면적이 증가할수록 집진효율이 증가하였다.
- ② 22m² 실험에서 개선된 방전극은 기존의 방전극과 비교하여 약 5% 가량 더 높은 효율을 나타내어 개선효과를 확인할 수 있었다.
- ③ 기존 방전극과 개선된 방전극의 비교 실험에서 기존 방전극 사용시 44m²의 집진면적에서 얻어진 효율은 방전극 개선시 32m²의 집진면적을 사용하더라도 더 높은 효율 획득이 가능한 것으로 나타났다.
- ④ 방전극 개선을 통하여 집진면적을 약 30% 가량 줄일 수 있는 것으로 나타났다.
- ⑤ 유속 증가에 따른 효율 저하를 분석한 결과 기존 방전극과 비교하여 성능저하는 더 적은

것으로 나타났다.

- ⑥ 이상의 결과를 통하여 7.5m/s이상의 고유속 조건에서 90%이상의 고효율 전기집진기 개발이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 2003 건설핵심기술연구개발사업인 "지하공간 환경개선 및 방재기술연구개발-지하생활공간 방재기술 개발(과제번호: C03-02)" 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yoo, J. I. et al., 2008, Development of road tunnel ventilation system with electrostatic precipitator, Final Report of Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, EnE system Inc.
2. Kim, J. R., Weon, J. O., 2008, Development of road tunnel ventilation system with electrostatic precipitator, Proceedings of the SAREK '08 Winter Annual Conference, pp. 80-83.