

전기집진기 방전극 프레임 최적 설계

이후광*, 최재승, 황석환, 조창호 (두산중공업 기술연구원)

Optimal Design of Discharge Electrode Frame in Electrostatic Precipitator

H.G. Lee, J.S. Choi, S.H. Hwang and C.H. Cho (R&D Center, Doosan Heavy Industries & Construction)

ABSTRACT

In this study, position optimization of insulation rods and suspension rods in discharge electrode frame of electrostatic precipitator(EP) is performed using finite element analysis(FEA). The object of the optimization is to minimize the difference of altitudes in unevenly sagged horizontal structure and to regulate the size of materials within the allowable stress bounds. Uppermost horizontal channel of discharge electrode frame is highly stressed and uniformity of lowest horizontal angle depends on the position of rods. Ten types of frame are analyzed and one recommended model is presented.

Key Words : Electrostatic precipitator (전기 집진기), Discharge electrode frame (방전극 프레임), Optimal design (최적 설계), Finite element analysis (유한요소해석)

1. 서론

전기 집진기(electrostatic precipitator)는 기체 중에 포함된 분진에 전기장을 작용시켜 입자에 정전기적 특성을 주고 집진판에 반대의 극성을 하전하는 방법으로 기체를 정화하는 장치로 1900년대 초 미국과 독일을 중심으로 연구 개발이 시작되었다. 전기 집진기는 분진이 포집되는 집진판에 양의 직류전압을, 방전극에 음의 직류전압을 작용시킨 상태에서 분진이 포함된 기체를 통과시키면 분진이 음으로 대전되어 집진판에 부착된다. 이렇게 포집된 분진이 집진판에 쌓이면 포집 효율이 떨어지므로 지속적으로 포집된 분진의 제거가 필요하다. 건식 집진기의 경우에는 추타와 같은 기계적 충격을 이용하여 집진판에서 분진을 탈락시킨 후 중력에 의하여 낙하한 분진을 모아 처리하며, 습식 집진기의 경우에는 집진판에 유체를 흘려 세척한다^(1,2). 이러한 전기 집진기는 제철, 시멘트 등의 각종 플랜트와 화력 발전소 및 소각로에 필수적으로 적용되고 있으며, 환경 규제 강화의 세계적인 추세를 만족시키고 제작 비용 절감을 위하여 현재에도 선진 업체들을 중심으로 집진 효율의 향상과 설치 원가 절감을 위한 연구가 진행되고 있다. 집진 효율의 향상을 위한 연구로는 역전리(back corona) 현상을 감소시키기

위한 고전압 펄스 공급 하전 장치 적용, SO₃ 투입 등에 의한 분진 특성 조절 연구 등이 진행되고 있고, 설치 원가의 절감 측면에서는 집진판 간격의 확대와 방전극 형상 변경 등의 광폭 전기 집진기와 방전극 형식 변경 등의 연구가 진행되고 있다. 또한, 최근에는 이동 전극형 전기 집진 기술, 조합형 전기 집진 기술 및 마이크로 펄스 하전 기술 등의 개발 및 적용 등이 활발하게 추진되고 있다⁽³⁻⁵⁾.

본 연구에서는 화력 발전소에 설치되는 건식 전기 집진기의 방전극 프레임에 대한 구조 해석을 수행하여 구조물의 불균등한 변형을 최소화하는 최적 지지 위치를 선정하였다.

2. 방전극 프레임

일반적인 화력 발전소에 설치되는 전기 집진기의 설치 개략도는 Fig.1 과 같다. 배연 가스의 진행 방향에 평행하게 집진판과 방전극이 설치된다. 방전극 프레임은 방전극의 양 끝단에 방전극과 수직으로 위치하여 수 십개의 방전극을 지지하게 된다. 고압 전기가 흐르는 방전극은 상단의 절연체를 매개로 하여 전기 집진기 구조물에 고정된다. 전기 집진기 안에는 이러한 집진판, 방전극, 방전극 프레임으로 조합된 구조물 여러 개가 유동 흐름에 대하

여 직렬로 설치되어 있어 집진 효율을 높일 수 있다. 본 연구에서 다룬 전기 집진기의 경우 방전극 프레임의 크기는 대략 17m×13m이며, 방전극 프레임 사이의 간격은 약 4m이다. 이는 종래의 방전극 프레임 가로 길이의 두 배이며(Fig.2), 이와 같은 설계 변경을 통하여 상부에서 방전극 프레임을 지지하는 절연체를 줄일 수 있고, 협소한 전기 집진기 내부의 공간을 확보할 수 있다. 그러나, 구조물의 대형화에 따라 전체 구조의 변형이 불균등할 수 있어 전기적 안정성을 위하여 방전극 프레임은 중력 방향으로 고른 변형을 유지할 필요가 있으며, 허용 응력 범위 내에서 경제적인 구조물의 설계가 필요하다. 따라서, 방전극 프레임의 절연체 연결 막대 (insulation rod)와 상단과 하단의 연결 막대 (suspension rod)의 적절한 위치 선정이 필요하고, 전체 구조물에 대한 응력 계산을 통하여 구성 자재의 안정성을 검토할 필요가 있다. 방전극 프레임의 구조는 복잡하지 않은 라멘(Rahmen) 구조를 이루고 있으나, insulation rod 위치와 suspension rod의 위치 변경 및 구성 자재의 변경에 따른 반복적인 계산이 많은 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하는 것이 보다 적절하다.

방전극 프레임에는 동일 간격으로 방전극이 설치되고 insulation rod와 suspension rod의 위치는 각 방전극 설치 위치 사이의 중앙만이 가능하다. 그리고, insulation rod의 수량은 3개로 제한을 두었으나 suspension rod는 3개 또는 4개로 선택이 가능하다. 그리고, 선택 가능한 자재는 실제 제작에 투입되는 규격품의 종류에 따라 제한을 두었다.

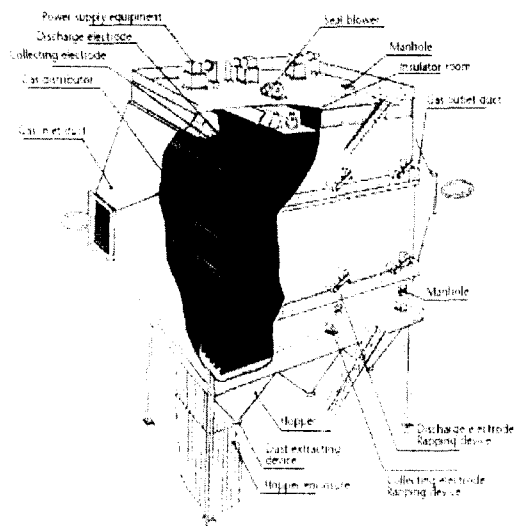


Fig.1 Dry - type electrostatic precipitator

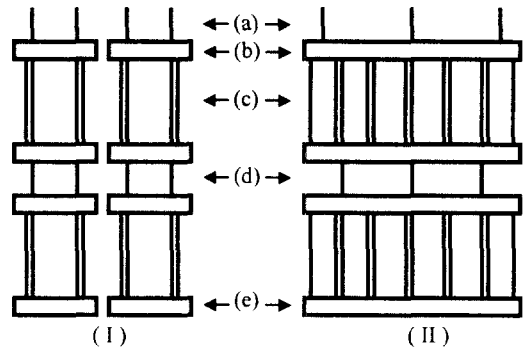


Fig.2 Discharge electrode frame (I) conventional, (II) modified [a: insulation rod, b: horizontal channel, c: vertical channel, d: suspension rod, e: angle]

3. 유한요소해석

방전극 프레임을 구성하는 자재는 round bar, channel, L beam의 세 가지 형태로 구분되므로, Fig.3와 같이 3차원 beam element를 이용하여 유한요소 해석 모델을 구성한다⁽⁶⁾. 유한요소해석 모델의 절점 (node)과 요소(element)의 개수는 suspension rod가 3개인 경우 각각 1,021개, 1,044개이고, suspension rod가 4개인 경우에는 각각 1028개, 1052개이다. 경계 조건은 Fig.3에서 보는 바와 같이 insulation rod 끝 부분은 고정되므로 완전 고정(clamp)의 경계조건을 적용하고, 수평으로 설치된 3개의 channel과 최하단의 angle에는 방전극이 설치되는 위치에서는 방전극이 갖는 강성으로 Z 방향으로의 변형이 구속된다고 가정할 수 있으므로 $u_z = 0, r_x = r_y = 0$ 의 경계조건을 적용한다.

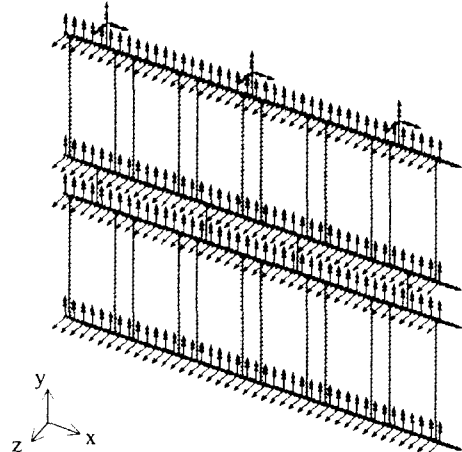


Fig.3 Finite element model and boundary condition

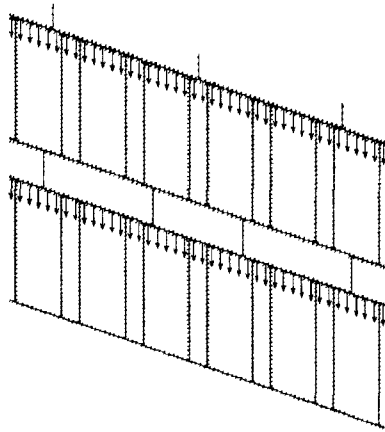


Fig. 4 Loading condition

하중 조건은 Fig.4 에서 보이는 바와 같이 각 방전극 설치 위치에 양쪽에서 지지되는 방전극 자중의 1/2 을 적용하였고, 중력 가속도를 이용하여 전체 구조물의 자중도 고려하였다.

유한요소해석은 최초 설계 시안과 그 시안에 대하여 insulation rod 와 suspension rod 의 위치를 변경하고, 자재를 변경하면서 총 10 개 변형 모델에 대하여 수행하였다. 각 모델은 최초 시안(case A), 최초 시안에 대하여 suspension rod 의 수량을 4 개로 늘리고 insulation rod 와 suspension rod 의 위치에 변화를 준 모델(case B ~ case F) 그리고, 변위차가 작은 모델에 대하여 부재를 변경하여 적용한 모델(case C-1 ~ case F-1)로 구분하였다.

4. 결과 분석

전기 집진기의 구조물에 대한 설계 허용 응력은 규정되어 있지 않다. 따라서, 일반 구조용 강으로 제작되는 프레임은 일반적인 구조물의 허용 강도로 통용되는 항복 응력의 2/3 를 채택하고 다시 안전율을 고려하여 허용 응력은 10 kgf/mm² 로 설정하였다⁽⁷⁾. 유한요소해석 결과는 Fig.5 와 Fig.6 에서 정리하였다. Fig.5 는 허용 응력에 대한 최대 응력의 비율이며, Fig.6 는 각각의 해석 결과에 대하여 최하단 angle 에서의 최대 변위차(Δ)를 최초 설계 시안(case A)의 결과(ΔA)와의 비율로 비교하였다.

최초의 설계 시안에 대한 해석 결과(case A)는 상부 channel 에서 허용 응력의 120%가 나타나고, 최하단 angle 에서의 변형에 의한 중력 방향 변위차는 설계 요구 조건을 초과한다. 최하단의 변위차는 설계 시안의 결과의 50% 이하가 제한이며, 충분히 작아야 한다. 이를 개선하기 위하여 suspension rod 의 수량을 3 개에서 4 개로 늘리는 것이 필요하다

(case B ~ case F). Insulation rod 와 suspension rod 의 간격을 조정하여 자재의 변경없이 최하단의 angle 에서의 최대 변위차를 초기 모델과 비교하여 50%로 제한할 수 있는 세 가지 모델은 C, E 그리고 F이다 그러나, 상부 channel 에서의 최대 응력은 여전히 허용 응력을 초과하는 수준이므로, 상부 channel 에 대한 자재 변경이 필요하다. 상부 channel 의 대체 자재를 적용한 결과, C-2, E-1 그리고 F-1 의 모델이 요구 조건을 만족한다.

자재 중량 증가의 최소화와 최하단 angle 의 최소 변위차를 고려하면 E-1 모델이 권장되며, E-1 모델의 변형과 응력의 해석 결과는 각각 Fig.7 과 Fig.8 에 제시하였다.

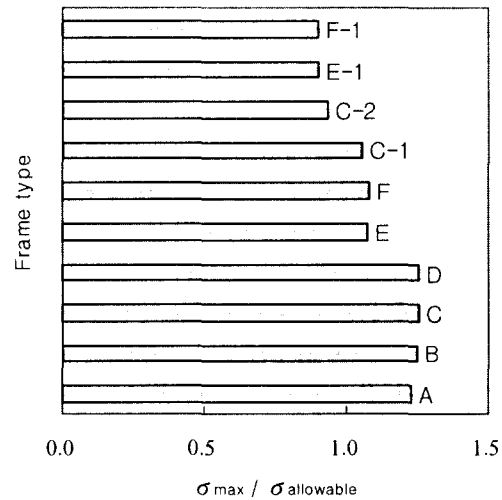


Fig. 5 Maximum equivalent stresses

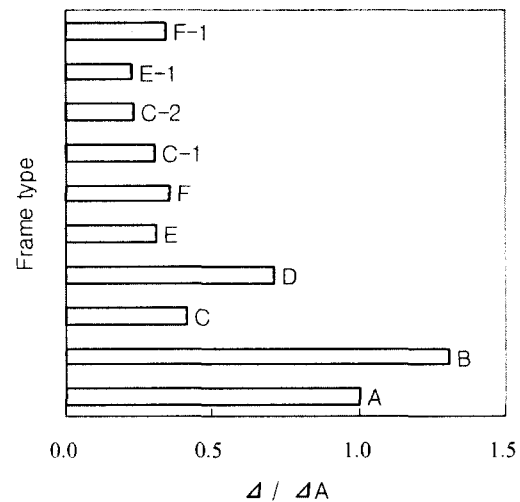


Fig. 6 Altitude differences of lowest angle

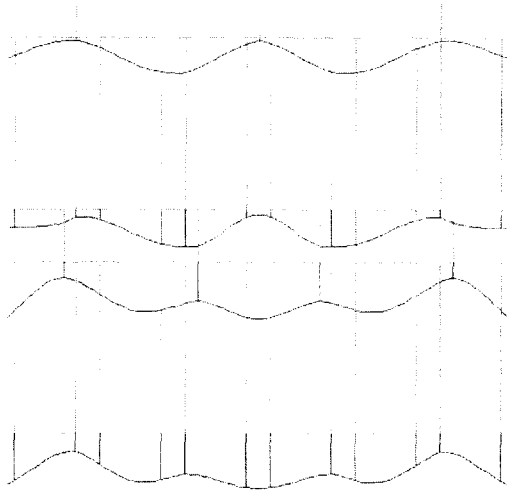


Fig. 7 Displacement result of model case E-1

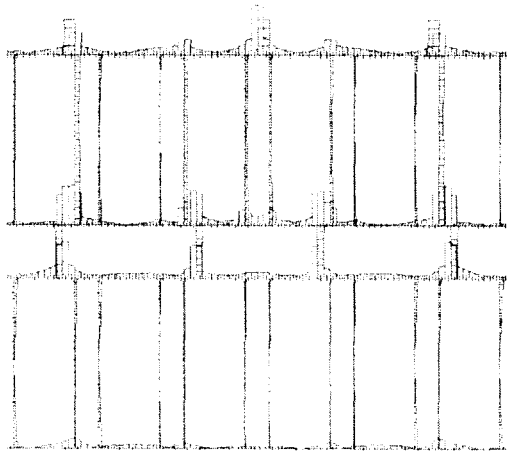


Fig. 8 Equivalent stress distribution on beam element of model case E-1

5. 결론

전기 집진기 방전극 프레임의 대형화와 절연체 연결 지점의 감소에 필요한 설계 최적화를 유한요소해석을 이용하여 수행하였고, 허용 응력을 만족하고 최하단 angle의 변형을 최소화하는 조건을 제시하였다.

참고문헌

1. Oglesy, S. and Nichols, G. B., "Electrostatic Precipitation," Marcel Dekker, New York, 1978.
2. Robinson, M., "Electrostatic Precipitation," Air Pollution Control, Part 1, Wiley-Interscience, New

York, 1971.

3. "고효율 전기집진기 개발," 환경부, 한국중공업, 1999.
4. 大浦 忠, 三坂 竣明, "Back Corona 對策型 電氣集塵裝置," 日本 靜電氣學會誌, Vol.14, No.16, 1990.
5. 松井 義雄, Kjell Porle, "Improvement of ESP's Performance Achieved with Microsecond Pulsing Energization," 火力原子力發電, Vol.41, No.2, 1990.
6. Manual of I-Deas Master Series 7.
7. Joseph Edward Shigley and Charles R. Mischke, "Mechanical Engineering Design," 5th edition, McGraw-Hill, 1989.