

## 정전집진기 집진판의 진동 특성

<sup>0</sup>나종문\*, 이기백\*\*, 양장식\*

(Vibration Characteristics of the Collecting Plates in Electrostatic Precipitator)

(Jong-Moon Na, Ki-Baik Lee, Jang-Sik Yang)

### 1. 서 론

최근 환경오염이 심각한 사회문제로 대두됨에 따라 환경오염원을 제거하기 위한 여러 가지의 집진장치가 개발되고 있는데 화력발전소에서는 건식정전집진장치(dry electrostatic precipitator)를 이용하고 있다<sup>(1,2)</sup>. 건식정전집진장치는 햄머(hammer) 방식의 충격장치를 설치하여 집진극과 방전극에 충격을 가함으로써 충격력을 극대화시키고 높은 분진박리 효과를 피하고 있는데 환경오염원이 되고 있는 집진판의 분진의 분리율을 높이기 위해서는 집진판의 전체 영역에서 분진을 동일하게 떨어뜨릴 수 있는 충격장치가 설계되어야 하는데, 이를 위해서는 충격하중에 따른 집진판의 진동 형태를 정확하게 분석하여야 한다.

본 연구에서는 집진판의 충격하중에 따른 진동의 형태를 분석하기 위해 펄스 레이저를 이용한 2중 노출 홀로그래피 시스템을 구성<sup>(3)</sup>하였다. 홀로그래픽 간섭계<sup>(4)</sup>는 이미 오래 전에 개발된 레이저 응용 계속기법으로서 주로 정현적인 진동을 하는 진동체의 진동 현상을 연구<sup>(5,6)</sup>하는데 많이 사용되어 왔는데 그 기술 개발은 상당한 수준에 있다. 그러나 종래의 기술들은 주로 헬륨-네온(He-Ne) 레이저와 같은 연속 레이저(continuous wave laser)를 이용한 기술인데 최근에는 루비(ruby) 레이저와 같은 펄스 레이저(pulse laser)를 이용한 기술이 많이 응용되고 있다. 이 펄스 레이저 홀로그래픽 간섭계를 Gottenberg<sup>(7)</sup>는 응력파에 의해서 발생된 변형을 측정하기 위해 사용하였고 Aprahamian 등<sup>(8,9)</sup>은 보(beam)와 평탄의 굽힘파(bending wave)의 전파 특성 연구에 이용하였다. 그 실험적 결과는 수치적 해석 결과와 비교되어 매우 좋은 일치성을 보였는데 이러한 펄스 레이저 홀로그래픽 간섭계 기법의 주요 장점은 어떠한 특정한 순간에 관찰하고자 하는 시험편의 전체 영역의 파동 전파 형상을 관찰할 수 있다는 것이다.

따라서 본 연구에서는 펄스 레이저를 응용한 2중 노출 홀로그래피법(double exposure holography method)을 이

용해서 집진판에 충격하중이 가해졌을 때 발생하는 진동의 발생과 전파 특성을 충격하중의 방향에 따라서 분석하였다.

### 2. 실험장치의 구성 및 실험방법

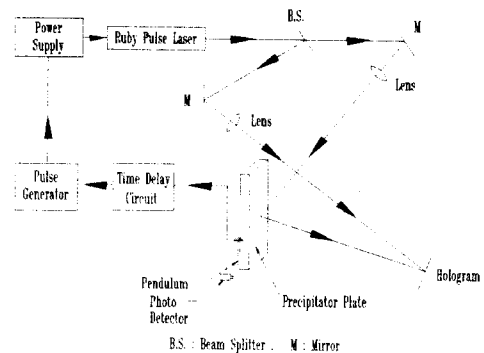


Fig.1 Experimental setup.

본 연구에서의 실험장치는 펄스 레이저를 이용한 2중 노출 홀로그래픽 간섭계의 광학계와 충격하중에 의해 발생한 진동의 시간적 변화에 따라 펄스 레이저를 발진시키기 위한 펄스 레이저 제동장치(trigger system), 그리고 4개의 집진판을 연결하여 구성한 집진판 조립체와 집진판 조립체에 충격하중을 발생시키기 위한 충격장치(impact loading system)로 구성된다.

펄스 레이저를 이용한 2중 노출 홀로그래피법은 레이저 광(laser beam)을 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)으로 이용하여 물체가 정지하고 있을 때와 진동하고 있을 때에 홀로그램 건판을 2번 노출시키면 홀로그램에는 물체의 2가지 상태에서의 물체광이 간섭하여 진동 진폭에 대응한 간섭 패턴(pattern)이 기록된다. 이 홀로그램을 재생하면 진동 진폭에 대한 간섭무늬가 얻어지는데 이러한 간섭무늬로부터 진동체의 임의의 위치에서의 진폭을 계산할 수 있다.

Fig.1은 실험장치도를 나타낸다. 루비 펄스 레이저(ruby pulse laser)로부터 발진된 레이저 광은 광분할기(beam splitter)에 의해서 2개의 광(laser beam)으로 나

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학과

누어지는데 그 중의 하나는 집진판에 입사되는 물체광으로 이용되고 다른 하나는 홀로그램 평면상에서 집진판으로부터 반사된 물체광과 간섭을 일으키기 위한 참조광으로 이용된다. 물체광과 참조광은 각각 볼록렌즈(concave lens)를 통과함으로써 확산된다. 또한 충격하중에 의해 집진판에 발생된 진동의 시간에 따른 전파 형태를 관찰하기 위해 시간지연회로(time delay circuit)와 펄스 발생기(pulse generator)로 이루어지는 펄스 레이저의 계동장치를 구성하였다. 본 실험에서 사용한 펄스 레이저는 전원공급장치(power supply)의 발진 버튼(fire button)을 눌러 주면 10V의 펄스 신호가 발생되는데 이 순간을 기준으로 1msec 후에 레이저 광이 발진된다. 그러므로 추(pendulum)가 자유낙하하여 집진판 조립체와 충돌하기 1msec 전의 순간을 광검출기(photo detector)가 검출하여 시간지연회로에 신호를 보내주고 시간지연회로는 광검출기로부터 신호가 입력된 순간을 기준으로 하여 설정된 임의의 시간지연 후에 펄스 레이저가 발진되도록 펄스 발생기를 통해 펄스 신호를 펄스 레이저의 전원공급장치로 발생하여 준다. 그러므로 충격하중에 의해 발생된 진동의 전파에 따른 임의의 순간을 시간지연회로에 설정함으로써 충격 발생 후의 시간에 따른 진동의 변화 양상을 관찰할 수가 있다.

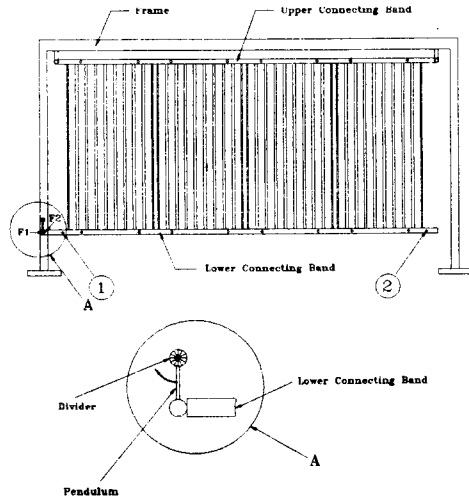


Fig. 2 Assembly of collecting plates  
(① and ② represent supporting position).

Fig. 2는 본 실험에서 제작한 집진판의 조립 상태와 충격장치를 나타낸다. 요철 평판의 형상을 갖는 4개의 집진판을 동일 평면상에서 나란하게 배열하고 집진판의 상단과 하단에서 철재(steel)의 연결띠(connecting band)를 이용하여 체결하는데 각 집진판의 상단과 하단 각각 2군데에서 집진판과 연결띠가 볼트로 체결된다. 그리고 상단 연결띠의 양쪽 가장자리에서 지지 구조물에 고정되는데

하단의 연결띠가 자유단(free edge)일 때 전단방향으로 충격하중을 가한 경우와 법선방향의 충격하중시 충격에 의한 집진판 조립체의 앞뒤로의 흔들림을 잡아주기 위해 하단 연결띠의 양쪽 가장자리 부근(Fig. 2의 ①과 ②)에 지지점을 설치하여 법선방향으로 충격하중을 가한 경우에 대해서 진동 실험을 수행함으로써 충격하중의 방향에 따른 진동 특성을 고찰하였다. 집진판의 충격은 추를 일정한 높이에서 자유낙하시켜 집진판 조립체의 하단 연결띠에 충격하중이 가해지도록 구성하였다. 그리고 추는 직경 6.3mm, 질량 1.05g의 강구(steel sphere)를 이용하였다.

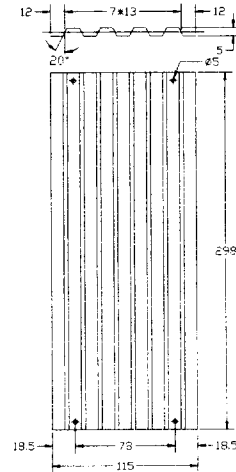


Fig. 3 Dimension of collecting plate.

Fig. 3은 1개의 집진판 사양도를 나타낸다. 집진판의 가로 길이는 115mm이고 세로 길이는 298mm이다. 요철은 전체가 9개로 구성되는데 양쪽 끝단의 요철 폭은 12mm이고 양쪽 끝단을 제외한 중간 7개의 요철 폭은 각각 13mm이다. 그림에서 상단과 하단의 4군데 원(circle)은 집진판과 연결띠를 체결하는 볼트의 위치를 나타내는데 집진판의 두께는 0.3mm이고 재질은 강판(steel plate)이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 전단방향으로 충격하중을 가한 경우의 진동 특성

Fig. 4는 집진판 조립체의 충격하중 실험결과를 나타내는데 시간에 따른 진동의 변화 과정을 보여주고 있다. 실험조건은 집진판 조립체의 하단을 자유단으로 하였고 충격하중을 사진의 왼쪽 하단에서 전단방향(Fig. 2에서 F1 방향)으로 가하였다. 편의상 충격 지점에 가까운 사진의 왼쪽으로부터 각각의 집진판을 집진판-1, 집진판-2, 집진판-3, 집진판-4로 명명한다.

(a)는 충격 후 80 μsec 순간의 진동 형태이다. 집진판-1에서는 하단의 2군데 볼트 체결부를 중심으로 충격하중에

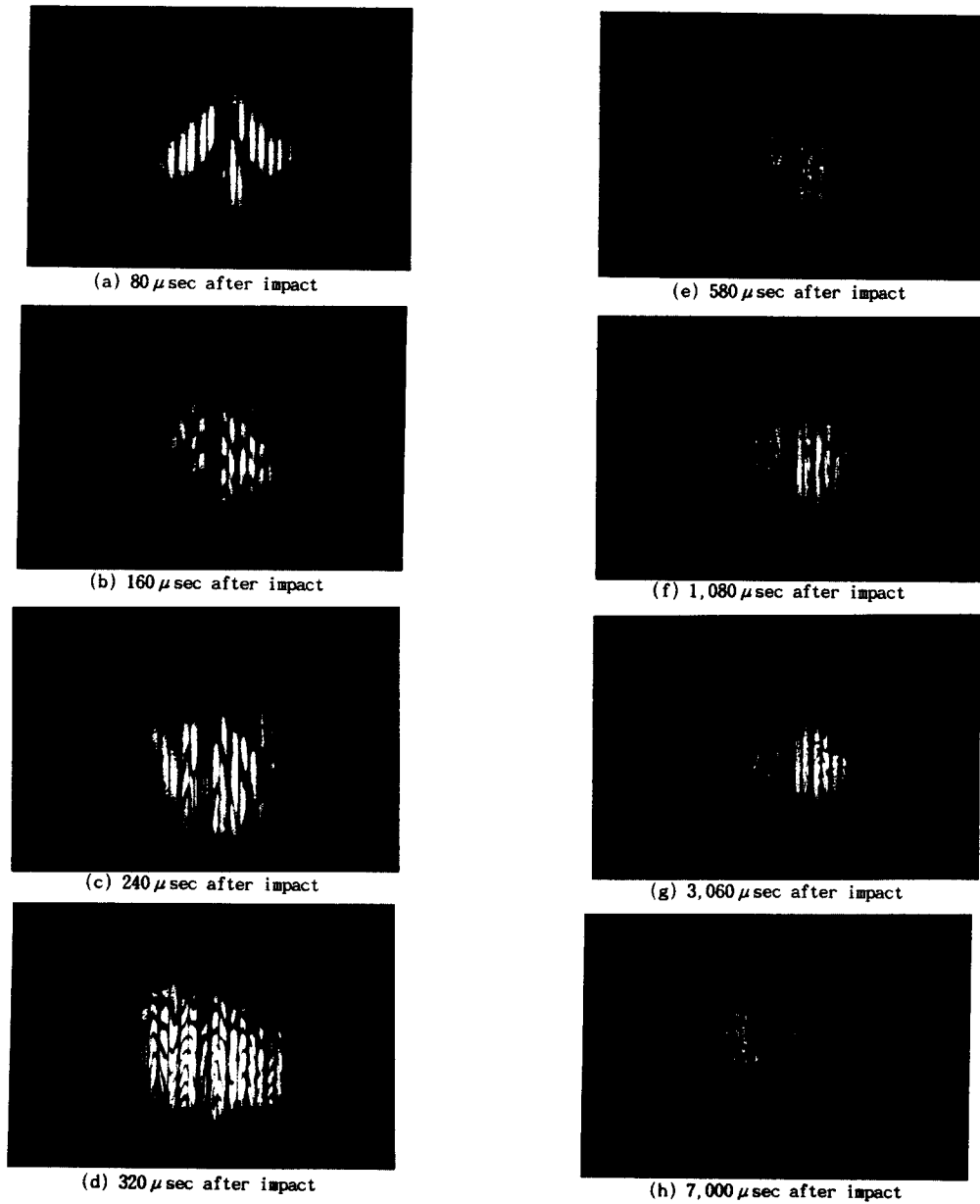


Fig.4 Transient wave propagation of collecting plates by impact load(Lower connecting band: free, impact load:shear direction at lower left side).

의한 탄성파가 발생되어 있으며 집진판-2에서는 하단의 왼쪽 볼트 체결부를 중심으로 형성된 탄성파의 초기 생성을 볼 수 있다. 그리고 4개의 집진판 전체에 걸쳐서 집진판 자체의 미소한 요동을 나타내는 간섭무늬가 형성되어 있는데 이러한 미소 진동은 본 실험에서 구성한 집진판의 두께가 상당히 얇은 것의 영향이라 사료된다. (b)는 충격 후 160 μsec 순간의 진동 형태이다. 집진판-1과 집진판-2, 집진판-3에서는 하단의 2군데 볼트 체결부에서 발생

하여 합성된 탄성파가 상부로 전파하고 있으며 집진판-4에서는 하단 왼쪽 볼트 체결부에서 탄성파의 발생이 관찰되고 있다. (c)는 충격 후 240 μsec 순간의 진동 형태이다. 집진판-1과 집진판-2의 상부에서는 하단에서 발생되어 상단에 도달된 탄성파가 상단의 2군데 볼트 체결부를 중심으로 반사파를 형성하고 있음을 보인다. 그리고 집진판-3과 집진판-4에서는 하단에서 발생된 탄성파가 거의 상단에까지 도달하고 있다. (d)는 충격 후 320 μsec 순간

의 진동 형태이다. 4개의 집진판들이 거의 유사한 형태로 진동하고 있는데 하부에서는 하단에서 형성된 탄성파가 합성되면서 상부로 전파하고 있고 상부에서는 상단에서 형성된 반사파가 합성되면서 하부로 전파하고 있다. (e)-(g)는 충격 후 각각  $580\mu\text{sec}$ ,  $1,080\mu\text{sec}$ ,  $3,060\mu\text{sec}$  순간의 진동 상태를 나타낸다. 4개의 집진판이 거의 유사한 진동 형태를 유지하면서 진폭이 점점 증가하고 있는데 시간이 경과함에 따라 각 집진판의 가로 중심선을 경계로 대칭적으로 진동하고 있음을 알 수 있다. (h)는 충격 후  $7,000\mu\text{sec}$  순간의 진동 형태인데 충격 후 시간이 더욱 더 경과함에 따라 집진판의 각각의 요철면이 서로 다른 진동 형태로서 거동하고 있음을 보인다. 이상과 같은 실험결과를 정리하여 보면 다음과 같다. 집진판 조립체에 충격하중이 가해지면 충격하중으로 인한 탄성파가 각 집진판의 하단 2군데 볼트 체결부를 중심으로 생성되어 합성되면서 상단으로 전파하여 간다. 상단에 도달된

탄성파는 각 집진판의 상단 2군데 볼트 체결부를 중심으로 반사파를 형성하는데 시간이 지남에 따라 하부에서 성장한 탄성파와 상부에서 성장한 반사파가 합성되면서 4개의 집진판은 거의 동일한 진동 형태를 보인다. 4개의 집진판이 유사한 진동 거동을 유지하면서 각 집진판의 가로 중심선을 경계로 상부와 하부의 진동이 대칭적인 형상으로 발전하는데 이러한 상태의 진동이 상당히 오랫동안 유지된다. 그 후 각 집진판의 개개의 요철면이 서로 상이한 진동 거동을 보이게 된다.

### 3.2. 법선방향으로 충격하중을 가한 경우의 진동 특성

Fig.5는 집진판 조립체 하단의 연결띠 양쪽 가장자리 부근(Fig.2의 ①과 ②)에 지지점을 설치하고 하단 왼쪽의 뒤에서 법선방향(Fig.2에서 F2 방향)으로 충격하중을 가한 경우의 시간에 따른 진동의 변화 과정을 나타낸다.

(a)-(f)는 충격 후 각각  $80\mu\text{sec}$ ,  $160\mu\text{sec}$ ,  $240\mu\text{sec}$ ,

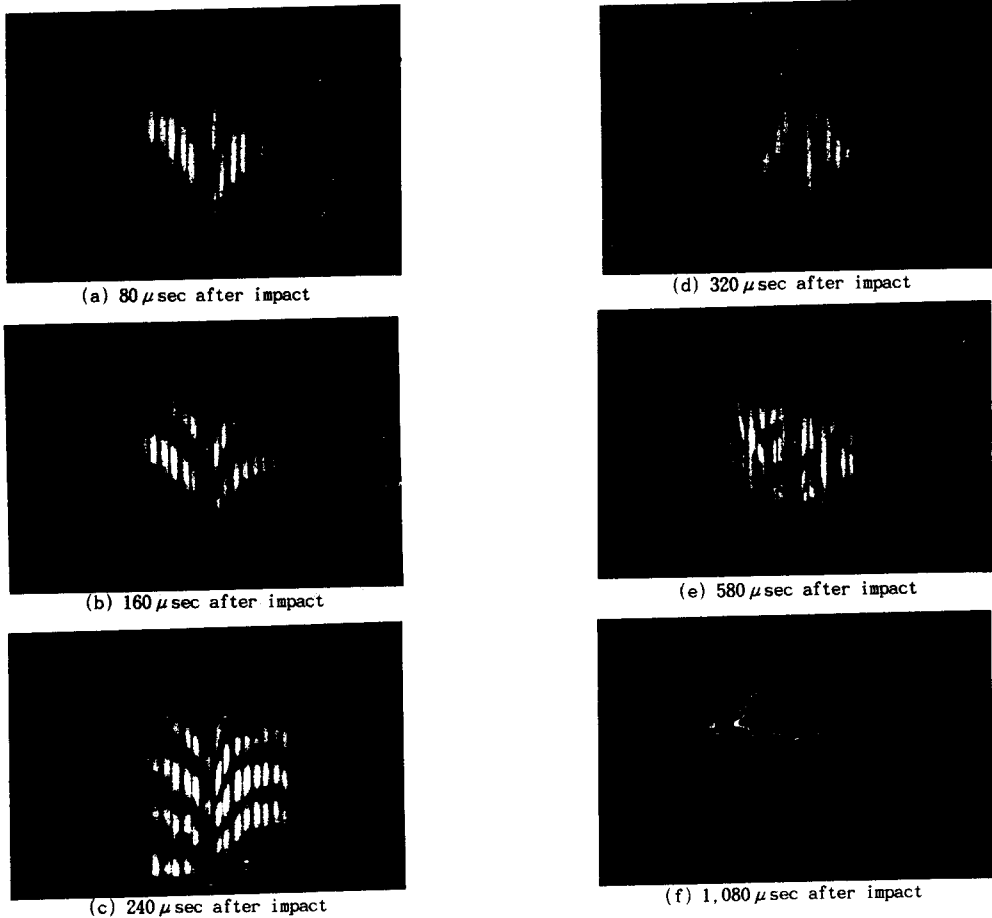


Fig.5 Transient wave propagation of collecting plates by impact load(Lower connecting band: supported, impact load:normal direction at lower left side).

320  $\mu$ sec, 580  $\mu$ sec, 1,080  $\mu$ sec 순간의 진동 상태를 보인다. 본 실험의 결과는 3.1절의 결과와 비교하여 진동의 발생 및 전파 과정이 전체적으로 유사하므로 진동 상태의 변화 과정을 간략하게 고찰한 후 그 특성의 차이점을 자세히 살펴보기로 한다. (a)에서는 충격하중시 집진판의 요동으로 인한 미소한 진동을 나타내는 간섭무늬가 형성되어 있는데 하단의 볼트 체결부를 중심으로 한 탄성파의 발생은 관찰되지 않는다. (b)에서는 집진판-2의 하단 왼쪽 볼트 체결부에서 탄성파가 형성되어 있다. (c)에서는 집진판-3의 하단 왼쪽 볼트 체결부에서 탄성파가 형성되어 있다. (d)에서는 하단에서 발생한 탄성파가 서로 합성되면서 상부로 전파하고 있는데 집진판-4의 하단 왼쪽 볼트 체결부까지 탄성파가 형성되어 있다. (e)에서는 집진판-1과 집진판-2의 하단에서 발생한 탄성파가 상단에까지 거의 도달하였지만 집진판-3에서는 아직 상단에까지 도달하지는 못하고 있다. (f)에서는 하단에서 발생한 탄성파와 상단에서 발생한 반사파가 서로 합성되어 있다. 본 실험결과와 3.1절의 실험결과와의 비교를 통한 충격하중의 방향에 따른 진동의 전파 특성에 있어서 그 차이점은 다음과 같다. Fig. 4의 (a)-(d)와 Fig. 5의 (a)-(d)를 비교하여 보면 법선방향으로 충격하중을 가한 경우에는 전단방향으로 충격하중을 가한 경우보다 하단의 연결 띠를 통한 진동의 전파가 늦어져 각 집진판의 하단 볼트 체결부에서 생성되는 탄성파의 발생이 늦어진다. 또한 Fig. 5의 (d)와 (e)를 보면 각 집진판의 하단에서 생성된 탄성파의 합성이 매우 천천히 진행되는 것을 볼 수 있다. 이러한 영향으로 하단의 2군데 볼트 체결부를 중심으로 형성된 탄성파가 각각 상당히 성장하고 난 후 서로가 합성되므로 각 집진판의 진동 거동이 집진판에 따라 많은 차이를 나타낸다. 그리하여 4개의 집진판이 유사한 진동 형태를 보이는 순간들이 거의 관찰되지 않는다. 따라서 집진판 조립체의 전체 영역에 걸쳐서 균일한 진동 거동을 발생시키기 위해서는 전단방향의 충격이 보다 더 효과적이라고 사료된다.

#### 4. 결 론

- (1) 펄스 레이저를 이용한 2중 노출 홀로그래픽 시스템은 충격하중에 의한 진동과 같이 아주 순간적이고 불규칙적인 진동을 관찰하고 해석하는데 있어서 매우 유용하다.
- (2) 집진판 조립체에 충격하중이 가해지면 집진판과 하단 연결띠의 볼트 체결부를 중심으로 집진판 내에 탄성파가 형성되어 합성되면서 상부로 전파하여 간다.
- (3) 전단방향으로 충격하중을 가한 경우에는 시간이 경과함에 따라 4개의 집진판 전체가 거의 유사한 진동 거동을 오랫동안 보이는데 집진판의 가로 중심선을 경계로 상부와 하부가 대칭적인 진동 형태를 보인다. 그 후 시간이 더욱 더 경과함에 따라 개개의 요철면이 서로 상이한 진동 거동을 보인다.

(4) 법선방향으로 충격하중을 가한 경우에는 전단방향으로 충격하중을 가한 경우에 비해서 집진판에 형성되는 탄성파의 전파가 훨씬 늦어진다. 그리하여 각 집진판의 2군데 볼트 체결부에서 발생한 탄성파의 합성이 상당히 천천히 진행되고 그 영향으로 각 집진판의 진동 거동이 상당한 차이를 나타낸다.

(5) 집진판 조립체의 전체 영역에 걸쳐서 균일한 진동 거동을 피하기 위해서는 전단방향의 충격하중이 법선방향의 충격하중보다 훨씬 더 효과적이다.

#### 참고문헌

- (1) Juricic, D., 1978, "Response of Collecting Plates in Electrostatic Precipitators Due to Shear Rapping," *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, Vol. 100, pp. 105-112.
- (2) 福澤清, 池上保彦, 藤島英勝, 島井敬志, 1988, "Rapping Characteristics of Electrodes in Dry Electrostatic Precipitators," *三菱重工技報*, Vol. 25, No. 2, pp. 170-175.
- (3) Felske, A. and Happe, A., 1978, "Vibration Analysis by Double Pulsed Laser Holography," *Society of Automotive Engineers*, No. 770030, pp. 88-104.
- (4) Vest, C.M., 1979, "Holographic Interferometry," *John Wiley and Sons, New York*.
- (5) Powell, R.L. and Stetson, K.A., 1965, "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 55, No. 12, pp. 1593-1598.
- (6) 이기백, 양장식, 나중문, 1992, "시간평균 홀로그래픽 간섭계를 이용한 경계조건의 변화에 따른 원형명판의 진동에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제16권, 제10호, pp. 1900-1907.
- (7) Gottenberg, W.G., 1968, "Some Application of Holographic Interferometry," *Experimental Mechanics*, Vol. 8, No. 9, pp. 405-410.
- (8) Aprahamian, R., Evenson, D.A., Mixson, J.S. and Wright, J.L., 1971, "Application of Pulsed Holographic Interferometry to the Measurement of Propagating Transverse Waves in Beams," *Experimental Mechanics*, Vol. 11, No. 7, pp. 309-314.
- (9) Aprahamian, R., Evenson, D.A., Mixson, J.S. and Jacoby, J.L., 1971, "Holographic Study of Propagating Transverse Waves in Plates," *Experimental Mechanics*, Vol. 11, pp. 357-362.