

산란이론과 신경회로에 의한 입자크기계측

Particle Sizing Using Light Scattering and Neural Networks

남 부 희, 이 상 재, 박 민 현, 이 영 진, 이 석 원, 류 태 우, 방 병 렬

(Boo Hee Nam, Sang Jae Lee, Min Hyun Park, Young Jin Lee, Seok Won Lee, Tae-U Yu, and Byeung-Ryeol Bang)

Abstract : Using the scattering theory of laser light, we analyze the particle sizing method. The scattered profile measured by the photodetector is sampled, scale conditioned by a 32 channel analog-to-digital converter, and is analyzed with the transform matrix from the light energy signals to the weights of the particle sizes. The particle size distribution is classified using the Hopfield neural network method as well as the conventional nonnegative least square method.

keywords : particle sizer, laser scattering, neural network

I. 서론

입자의 크기측정은 입자 크기의 분포가 중요한 분말, 화장품, 의약품, 안료뿐만 아니라, 화력발전소나 엔진의 연료 분사의 유체 분무, 배기가스 및 환경 오염정도 측정 등의 분야에서 많이 이용되고 있다. 레이저를 이용한 입자의 계측은 산업이나 연구 모두에서 중요하게 널리 쓰이고 있어 측정장비의 부가가치가 매우 높고 시장성도 넓어 기술 개발이 필요한 시점이나 국산화는 아직 되어 있지 않다.

레이저가 이용되기 전에는 입자크기의 측정을 위하여 Sedimentation, Electrostatic Charging, 현미경을 통한 측정 또는 사진의 확대방법을 사용하였다. 레이저가 발명된 이후로는 여러 가지 기술이 개발되어 왔다. 그 중에서 1976년 영국의 Swithenbank [1],[2],[3] 등에 의하여 개발된 방법은 Multi-Particle이 Laser Beam을 통과할 때 발생하는 회절패턴(diffraction pattern)을 분석하여 입자의 크기를 측정하는 기술로 영국의 Malvern 회사에 의해 상품화된 것이 대표적인 예의 하나이다[4],[5].

Fraunhofer 회절이론은 Mie의 정밀한 산란이론에 대한 근사적 현상이론으로 제한성이 있다. 즉, 회절(diffraction)에 의한 입자 크기 측정은 레이저의 파장보다 매우 큰 5-1000 마이크로미터(μm)의 범위에서만 잘 성립한다. 입자 크기가 $5\mu\text{m}$ 이하인 경우에는 Mie Scattering(산란)이론이 적용된다[6]. 산란현상은 회절 현상보다 더 복잡한 수식 표현을 갖지만 입자 크기의 더 넓은 범위에서 입자크기에 대한 더 많은 정보를 제공한다.

본 연구에서는 레이저의 회절성을 이용한 입자크기계측 [7]에서는 수 μm 내 입자크기의 측정에 제한성이 있으므로, 기존의 Mie의 산란이론을 이용하여, 이 범위에 속하는 입자크기에 대한 계측 이론을 이론적으로 구현하며, 이 때

입자크기의 분포에서 기존의 비음수 최소자승법과 Hopfield의 최적화기법으로 가중치를 구한다.

II. Mie산란에 의한 입자크기의 계측

그림 1에 입자크기 계측을 위한 전체적인 흐름이 나타나 있다. He-Ne 레이저를 평행화 렌즈를 통하여 평행광으로 만든 후 입자에 비추면 회절/산란하는데 이 광을 Fourier변환렌즈로 통과시키면 레이저 빛을 다시 모으고, 초점위치에 있는 초점평면에 입자고유의 무늬를 그리게 된다. 31개의 동심원으로 구성된 광센서(photo detector)로부터 이 무늬를 검출하고, 검출된 31개의 아날로그신호를 A/D변환하여 Mie산란이론에 의한 신호해석으로 입자크기의 분포를 구한다.

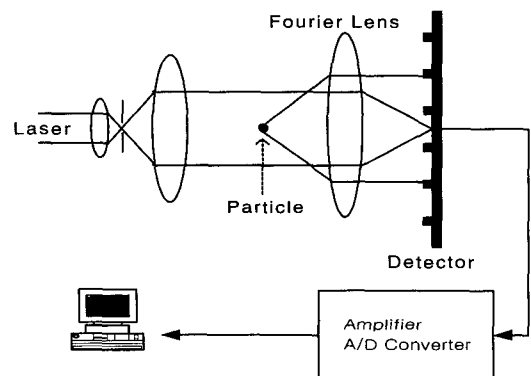


그림 1. 입자 측정기의 계통도.

Fig. 1. Schematic diagram of particle sizer.

산란이란 빛이 입자 또는 물질에 닿아 그 진행 방향을 변경하는 현상을 말한다. 입자 밀도가 작은 경우는 단일 산란으로써 다룰 수 있으나, 밀도가 커지면 입자 상호간의 산란을 고려한 다중 산란의 취급이 필요해진다.

산란에 의해서 방향이 바뀐 빛을 산란광이라 하는데 빛이 작은 요철이 있는 반사면이나 극히 작은 입자에 닿았을 때 산란에 의해 그 진행 방향이 바뀌게 된다. 이 때, 입사광에 대하여 부딪쳐 나오는 산란광의 진행방향과 입사광이 이루는 각을 산란각이라고 한다.

접수일자 : 1999. 9. 2., 수정완료 : 2000. 2. 29

남부희 : 강원대학교 전기전자정보통신공학부

이상재 : (주) 메디슨

박민현 : 삼성전자, 강원대RRC(석재복합신소재제품)

이영진 : 미래산업

이석원 : 강원대학교 제어계측공학부

류태우, 방병렬 : 한국생산기술연구원

※ 본 논문은 강원대학교 전기전자정보통신공학부 BK21사업의 일부지원을 받았습니다.

특히, 빛의 파장과 같은 정도의 크기의 입자에 의한 빛의 산란을 Mie 산란이라 부르며, 입자가 빛의 파장에 비해 매우 작은 경우는 Rayleigh 산란으로서 알려져 있지만 입자의 크기가 빛의 파장과 같은 정도가 되면 각 부분으로부터 산란광의 위상이 추가로 고려되어야한다.

이러한 경우 입사광이나 산란광은 그 빛의 세기 $I[\text{watt}/\text{m}^2]$ 만으로는 완전히 특징을 나타낼 수 없다. 따라서 복소수 함수로서 산란광의 크기와 위상을 나타내는 산란함수 $S_1(\theta, \varphi)$, $S_2(\theta, \varphi)$ 가 사용되며, 먼 거리 계(distant field)에서 임의의 점에서의 산란광은 구파(spherical wave)의 특성을 갖는데, 여기에서 에너지는 입자로부터 바깥쪽으로 흘러나온다. 산란의 방향, 즉, 입자로부터 이 점으로의 방향은 입사광의 전파방향과 방위각 φ 가 이루는 각 θ 에 의하여 특징 지워진다. 그림 2에 입자가 이루는 벡터 평면과 빛이 이루는 각 φ 와 입자에 부딪쳐 산란된 빛 θ 를 보인다.

산란된 빛은 설계된 센서에 의해 일정한 패턴(L_n)으로 인식되고, 구해진 T matrix와는 $L_{ij} = T_{ij} \cdot W_{ij}$ 의 관계를 가진다 여기서 W는 산란된 입자의 비율을 의미하며 물리적인 양이므로 항상 0보다 크다.

따라서, 비음수최소자승해를 적용한다면 입자군의 분포 값인 W를 구할 수 있다.

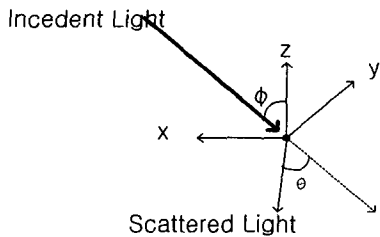


그림 2. θ 와 φ .
Fig. 2. θ and φ .

III. Detector 및 입자크기분포

빛의 산란을 감광하는 Detector는 감광되는 빛의 양이 거의 모든 면에서 동일하도록 한다. 본 논문에서 사용한 Detector의 크기는 Malvern 회사의 제품(모델2200)[4],[5]의 수치에 따랐으며 내용은 표 1과 같다.

Detector의 크기를 알면, 빛의 파장과 주파수에 따라 측정할 수 있는 입자의 크기군의 분포를 알 수 있다. 입자군의 크기는 임의의 산란각에서 최대 에너지인 X_m [2],[9]에 의해 결정되는데, s는 우리가 알고 있는 Detector의 반경 크기이고 λ 와 f 는 각각 빛의 파장과 초점

정리 1 : 에너지 분포의 첫 번째 최대값 X_m

$$X_m = \frac{2\pi a s}{\lambda f} = 1.3566 \quad (1)$$

거리를 의미한다. $\lambda=0.6328$, $f=300$, a = 입자의 크기로 표 1일 경우, 측정 가능한 입자의 크기는 위의 식에 따라 표 2와 같이 정리된다. 표 2의 a_i 와 a_o 는 입자의 그룹에서

표 1. 설계된 detector의 크기(μm).

Table 1. Designed detector size(μm).

	s_i	s_o
1	0.1490	0.2180
2	0.2540	0.3180
3	0.3530	0.4170
4	0.4520	0.5180
5	0.5540	0.6250
6	0.6600	0.7370
7	0.7720	0.8620
8	0.8970	1.0010
9	1.0360	1.1560
10	1.1910	1.3290
11	1.3640	1.5220
12	1.5570	1.7380
13	1.7730	1.9790
14	2.0140	2.2480
15	2.2830	2.5480
16	2.5830	2.8830
17	2.9180	3.2570
18	3.2920	3.6740
19	3.7090	4.1390
20	4.1740	4.6580
21	4.6930	5.2370
22	5.2720	5.8840
23	5.9190	6.6060
24	6.6410	7.4110
25	7.4460	8.3100
26	8.3450	9.3130
27	9.3480	10.4320
28	10.4670	11.6810
29	11.7160	13.0750
30	13.1100	14.6310
31	14.6660	16.3670

표 2. 입자 크기 그룹 (μm).

Table 2. Particle group (μm).

	a_i	a_o	a_M
1	15.1853	10.3789	12.7821
2	8.9079	7.1151	8.0115
3	6.4096	5.4259	5.9178
4	5.0058	4.3680	4.6869
5	4.0841	3.6202	3.8521
6	3.4282	3.0700	3.2491
7	2.9308	2.6248	2.7778
8	2.5224	2.2603	2.3914
9	2.1840	1.9573	2.0706
10	1.8998	1.7025	1.8011
11	1.6588	1.4866	1.5727
12	1.4532	1.3018	1.3775
13	1.2761	1.1433	1.2097
14	1.1234	1.0065	1.0650
15	0.9911	0.8880	0.9395
16	0.8760	0.7848	0.8304
17	0.7754	0.6947	0.7350
18	0.6873	0.6158	0.6516
19	0.6100	0.5467	0.5783
20	0.5421	0.4857	0.5139
21	0.4821	0.4320	0.4571
22	0.4292	0.3845	0.4069
23	0.3823	0.3425	0.3624
24	0.3407	0.3053	0.3230
25	0.3039	0.2723	0.2881
26	0.2711	0.2430	0.2570
27	0.2420	0.2169	0.2295
28	0.2162	0.1937	0.2049
29	0.1931	0.1730	0.1831
30	0.1726	0.1546	0.1636
31	0.1543	0.1382	0.1463

상한과 하한을 각각 나타내고, aM 은 입자군의 평균이다.

IV. 산란이론의 구현

I_0 를 입사광의 세기라 하면, 입자로부터 먼 거리 r 에 있는 점에서의 산란광의 세기를 I 라하고, λ 를 주위 매질에서의 파장, 산란파수 $k = 2\pi/\lambda$ 이라고 하면, 입자 하나의 경우 임의의 방향에서 산란광은 편직선 편광을 갖고 그 세기 [watt/m²]는

$$I = I_0 \frac{(i_1 + i_2)}{2k^2 r^2} \quad (\text{단, } k = \frac{2\pi}{\lambda}) \quad (2)$$

가 된다. i_1 과 i_2 는 입사광과 산란광의 전파 방향을 관통하는 평면에 각각 수직과 평행으로 진동하는 빛의 세기이다. 임의의 각도 θ 에서 두 면에 산란된 빛의 편극된 성분인 i_1, i_2 강도 함수는

$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} a_n \pi_n(\cos \theta) + \frac{2n+1}{n(n+1)} b_n \tau_n(\cos \theta) \right|^2 = |S_1(\theta)|^2 \quad (3)$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} b_n \pi_n(\cos \theta) + \frac{2n+1}{n(n+1)} a_n \tau_n(\cos \theta) \right|^2 = |S_2(\theta)|^2 \quad (4)$$

로 표현된다[4],[6],[9].

여기서 $\pi_n(\cos \theta)$ 와 $\tau_n(\cos \theta)$ 는 각도계수, a_n 과 b_n 은 산란계수인데 이들을 구하는 과정은 다음과 같다.

1. 각도계수 (π_n, τ_n)의 설계

각도 계수 $\pi_n(\cos \theta)$ 과 $\tau_n(\cos \theta)$ 은 Legendre 다항식의 n 차 항으로 표현된다[9].

$$\begin{aligned} \pi_n(\cos \theta) &= \tilde{P}_n(\cos \theta) \\ \tau_n(\cos \theta) &= [\cos \theta \tilde{P}_n(\cos \theta) - (1 - \cos^2 \theta) \tilde{P}'_n(\cos \theta)] \end{aligned} \quad (5)$$

간단히 정리하면, 아래와 같이 순환식으로 표현된다.

$$\pi_n(X) = \frac{(2n-1)}{(n-1)} X \cdot \pi_{n-1}(X) - \frac{(2n-1)n}{(n-1)} \cdot \pi_{n-2}(X) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tau_n(X) &= n \cdot X \cdot \pi_n(X) - (n+1) \pi_{n-1}(X) \end{aligned} \quad (7)$$

초기치는 다음과 같이 주어 진다.

$$\begin{aligned} \pi_0(X) &= 0, \pi_1(X) = 1, \pi_2(X) = 3x \\ \tau_0(X) &= 0, \tau_1(X) = x, \tau_2(X) = 6x^2 - 3 \\ (\text{단, } x &= \cos \theta) \end{aligned}$$

그림 3는 위 초기치로 Legendre 다항식의 형태를 지니

는 각도함수 π_n 과 τ_n 을 $n=7$ 차항까지 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ 범위에서 도시한 것이다.

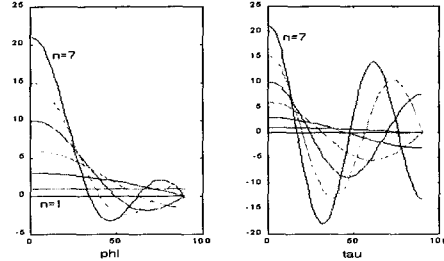


그림 3. $0 \leq \theta \leq \pi/2$ 에서의 π 와 τ .

Fig. 3. π and τ for $0 \leq \theta \leq \pi/2$.

2. 산란계수 (a_n, b_n)의 설계

표 2와 같이 측정 가능한 입자의 크기 군이 정해지면 입자의 크기에 대한 산란계수를 구할 수 있다.

산란계수는 각각 a_n 과 b_n 으로 표현되는데, 다음과 같이 정의된다[5],[6],[9].

$$a_n = \frac{S_n(y)S_n(a) - mS_n(a)S_n(y)}{S_n(y)\Phi(a) - \Phi(a)S_n(y)} \quad (8)$$

$$= [1 + iG_n(a, y)]^{-1}$$

$$b_n = \frac{mS_n(y)S_n(a) - S_n(a)S_n(y)}{mS_n(y)\Phi(a) - \Phi(a)S_n(y)} \quad (9)$$

$$= [1 + iH_n(a, y)]^{-1}$$

(단, $a = \frac{2\pi a}{\lambda}, m = n(1 - ik), y = ma$)

$$S_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z)$$

$$\Phi_n(z) = S_n(z) + iC_n(z)$$

$$C_n(z) = (-1)^n \sqrt{\frac{\pi z}{2}} J_{-(n+\frac{1}{2})}(z)$$

J_n 는 n 차의 Bessel 함수

그런데,

$$H_n(a, y) = \frac{mR_n(y)C_n(a) - C_{n-1}(a)}{mR_n(y)S_n(a) - S_{n-1}(a)} \quad (10)$$

$$G_n(a, y) = \frac{W_n(y)C_n(a) - C_{n-1}(a)}{W_n(y)S_n(a) - S_{n-1}(a)} \quad (11)$$

$$W_n(y) = \frac{1}{m} R_n(y) + \frac{n}{a} (1 - \frac{1}{m^2}) \quad (12)$$

$$R_n(y) = \left[\frac{2n-1}{y} - R_{n-1}(y) \right]^{-1} \quad (13)$$

이고,

$$D_n = mR_n(y)C_n(a) - C_{n-1}(a) \quad (14)$$

$$E_n = mR_n(y)S_n(a) - S_{n-1}(a) \quad (15)$$

이라고 표현하면,

$$H_n(a, y) = \frac{D_n}{E_n} \quad (16)$$

이 되고, 다음과 같이 산란 계수 b_n 을 구할 수 있다.

$$b_n = \frac{1}{1 + iH_n(a, y)} \quad (17)$$

마찬가지로

$$K_n = W_n(y)C_n(a) - C_{n-1}(a) \quad (18)$$

$$L_n = W_n(y)S_n(a) - S_{n-1}(a) \quad (19)$$

이면,

$$G_n(a, y) = \frac{K_n}{L_n} \quad (20)$$

다음과 같이 산란 계수값 a_n 을 구할 수 있다.

$$a_n = \frac{1}{1 + iG_n(a, y)} \quad (21)$$

a_n , b_n 은 복소수의 형태이고, 그림 4는 1, 7, 14, 28 번째의 평균 입자군의 a_n 과 b_n 을 그린 그림이며, 입자의 크기가 클수록 산란계수의 분포가 균일해지는 것을 보여준다[9].

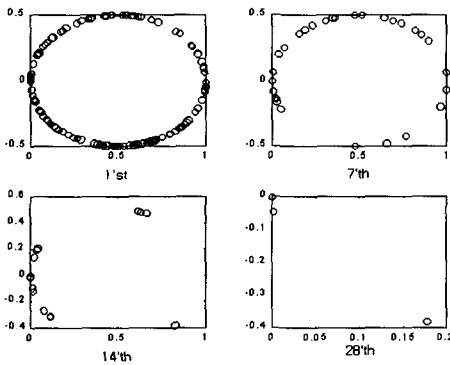


그림 4. 1, 7, 14, 28 입자에 대한 산란 계수 a_n and b_n .
Fig. 4. Scattering coefficient a_n and b_n for particle 1, 7, 14, 28.

3. 강도함수의 분포

산란계수와 산란함수를 이용하면, 특정 입자에 대한 강도함수를 구할 수 있고, 그 모양과 크기는 그림 5와 같다. 입자의 크기가 클수록 에너지가 한 곳에 집중된다.

4. 변환행렬 T

편 강도함수 i_1, i_2 가 구해지고 나면 (2)에서 강도함수가 구해지고 이를 적분하면 각각의 산란각에 대한 빛에너지를 다음과 같이 구할 수 있다[1],[2],[6].

$$LL_{ik} = 2\pi f^2 \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} I_{ik} d\theta \quad (22)$$

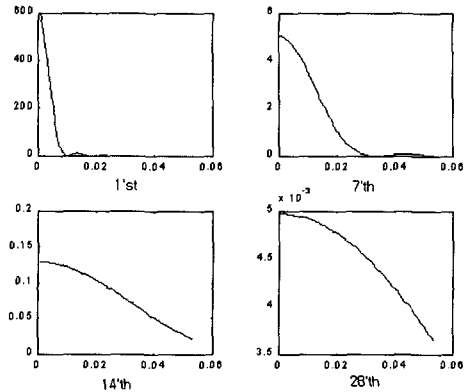


그림 5. 1, 7, 14, 28 입자에 대한 강도분포 I.
Fig. 5. Intensity distribution I for particle 1, 7, 14, 28.

LL_{ik} 는 Detector의 세분된 각에서 나온 빛의 강도를 합한 값이다. 여기서 θ_k 는 각 Detector 링에 대한 산란각도이며 $d\theta$ 는 Detector의 산란각 θ 를 일정 간격으로 세분한 각을 의미한다.

N 개의 입자가 있을 경우의 가중치(N_i)를 고려하면, (22)는 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다[9].

$$LL_{ik} = 2\pi f^2 N_i \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} I_{ik} d\theta \quad (23)$$

(단, $N_i = \frac{3W_{ij}}{4\pi a_i^3}$)

그러면 각 Detector에 대한 빛 에너지 L_{ij} 은

$$L_{ij} = \frac{2\pi f^2 W_{ij}}{4\rho\pi a_i^3} \cdot \sum_{k=(j-1) \cdot \text{deri} + 1}^{(j-1) \cdot \text{deri} + \text{deri}} LL_{ik} \quad (24)$$

(단, i 는 i 번째 입자 크기군을, j 는 j 번째 Detector의 링을 나타낸다)의 형태를 갖게 된다.

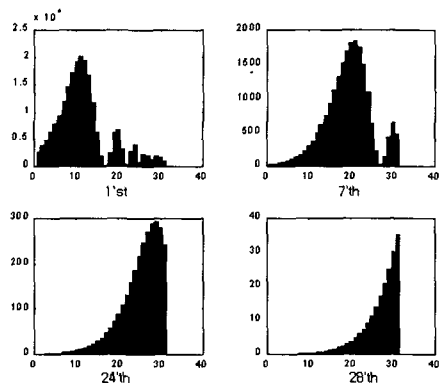


그림 6. 1, 7, 14, 28 입자의 에너지 분포.
Fig. 6. Energy distribution for particle 1, 7, 14, 28.

그림 6는 몇 개의 입자에 대한 L_{ij} 의 분포를 그린 것이

다. x좌표는 Detector 링의 번호 j를, y 좌표는 Detector에 감광된 에너지량이다.

(24)에서 가중치를 뺀 값을 T라 하고, 아래와 같이 표현된다[9].

$$T_{ij} = \frac{k}{a_j^3} \cdot \sum_{k=(j-1) \cdot deri+1}^{(j-1) \cdot deri+deri} LL_{ik} \quad (25)$$

(deri : 한 θ 내의 $d\theta$ 의 개수, k = 상수)

a_j 는 j 번째 입자크기 그룹을 대표하는 입자그룹의 평균값이다. 그림 7은 표 2의 평균 입자군에 대한 변환행렬 T를 그린 그림이다.

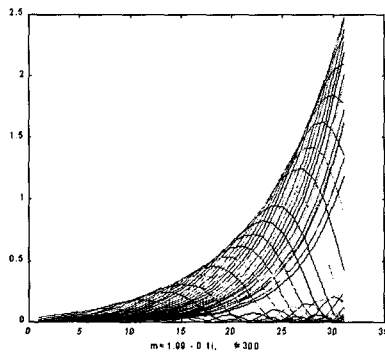


그림 7. 설계된 T matrix.
Fig. 7. Designed T matrix.

전체 수식은 아래와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$L_{in} = T_{in} \cdot W_n \quad (26)$$

W는 각 평균 입자의 weight로 우리가 구하고자 하는 값이다. L은 detector를 사용하여 감광된 빛의 양으로 측정하여 주어지는 값이고, T는 IV.4 에서 설계되었다. 따라서 (26)을 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 그런데 W는 물리적인 양으로 음의 수 일수 없는 제약 조건이 있다. 때문에 기존에 많이 이용하던 방법은 비음수 최소 자승 해(NNLS)를 이용하는 것이다[7]. 레이저 빛의 회절성을 이용한 입자크기분포의 경우에서 비음수최소자승법의 해는 참고문헌[3]에 자세하게 나타나 있다. 입자군의 개수는 우리가 임의로 정할 수 있다. 만일 입자군의 개수를 31개가 아닌 16개로 하였을 경우에는 T행렬은 31×16의 크기가 될 것이다.

V. 입자크기분포의 해

1. 비음수 최소자승법

L = TW에서 W는 물리적인 양으로 음의 수가 될 수 없다. 비음수 최소 자승해 (nonnegative least square method)는 가장 널리 사용되는 방법으로 최소한의 에러로 음의 수를 가지지 않고 해를 구하는 것이다[3][7].

2. Hopfield 형태의 최적화 신경회로법

QP(quadratic programming : 2차형 프로그래밍)문제에서 오직 부등식 제한조건만을 갖는 경우는 다음과 같이 공

식화 될 수 있다.

최소화 :

$$f(x) = c^T x + \frac{1}{2} x^T G x \quad (27)$$

제한조건 : $Ax - b \geq 0, x \geq 0$

여기서 G는 $n \times n$ 대칭 양한정(symmetric positive definite)행렬이고,

$$x \in R^n, c \in R^n, b \in R^m, A \in R^{m \times n}$$

이다.

벌칙함수법(penalty method)에 따라 벌칙함수항을 갖는 에너지함수를 다음과 같이 구성한다.

$$E(x, k) = f(x) + \frac{k}{2} \sum_{i=1}^m ([r_i(x)]_-)^2 \quad (28)$$

여기서 $x \geq 0$, k는 벌칙함수, 매개변수

$$r_i(x) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - b_i \quad (29)$$

는 잔차(residual error), $[r_i]_- = \min\{0, r_i\}$ 는 벌칙함수 항이다. 경사법(gradient approach)을 이용하여 우리는 최적화문제를 에너지함수 $E(x, k)$ 의 최소화문제로 바꾸어 다음의 미분방정식으로 표현되는 Hopfield 신경회로로 변환시킬 수 있다.

$$\frac{dx_j}{dt} = -\mu \left[c_j + \sum_{i=1}^m g_{ij} x_i + k \sum_{i=1}^m S_i a_{ij} r_i(x) \right], \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (30)$$

단, $\mu > 0, k > 0, S_i = \begin{cases} 1, & r_i(x) < 0 \\ 0, & r_i(x) \geq 0 \end{cases}, g_{ij} = T^T T$ 이다.

한편, $TW = L, W \geq 0$ 의 문제는

$$\min f(W) = \frac{1}{2} \| TW - L \|^2, W \geq 0 \text{의 문제, 즉,}$$

$$f(W) = \frac{1}{2} W^T (T^T T) W - L^T T W + \frac{1}{2} L^T L \quad (31)$$

가 되어, (27)과 비교하면

$$x = W, G = T^T T, c^T = -L^T T, c = -T^T L$$

와 동가 문제가 되고, 가중치(weight)

$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 는 $w_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n$ 이므로 $A=I$ (identity matrix), $b=0$ 이다.

이 문제를 디지털 컴퓨터로 시뮬레이션 하는 경우에는 상미분방정식을 Runge-Kutta적분방법으로 풀어야하기 때문에 다소 시간이 걸릴 수는 있으나, 이를 저항, 커패시터, OP amp등의 아날로그컴퓨터로 구현하는 경우에는 매우 빠르게 답을 낼 수 있다.

VI. 결론

레이저광의 회절과 산란 성질 중에서 레이저광의 파장 내외의 크기를 갖는 입자크기의 계측방법에 알맞은 Mie산란이론을 이용하여 입자크기계측에 대한 방법을 구현하였다. 레이저광에 의하여 입자에서 산란이 일어난 후 이 빛이 31개의 절연으로 되어있는 Photo Detector에 빛에너지가 감응되면 입자크기에 따른 고유한 패턴이 이 센서에 발생된다. 레이저광의 산란이론에 의하여 빛에너지의 분포를 입자크기분포로 변환시키는 행렬식 (26)을 만든다.

행렬식 (26)의 W는 평균 입자군의 분포도를 정보로 가지고 있는데, 이는 물리량이라는 제약 조건으로 인하여 기존에는 이를 분류하는 방법으로 비음수최소자승법 [3],[7],[9]을 사용하였다.

본 논문에는 비음수최소자승법과 함께 지능기법인 Hopfield의 신경회로망을 도입하여 평균 입자군의 분포값을 계산한다.

그림 8은 비음수최소자승해를 이용하여 임의의 입자군에 대한 분포를 그린 그림이다. 입자크기의 그룹을 31개로 하였을 때, 18번째 그룹의 입자만이 있을 때, (a)는 이 그룹 입자에 대한 에너지의 분포이며 (b)는 입자군의 분포를 백분율로 환산하여 그린 그림이다.

그림 9은 Hopfield 신경회로망을 이용하여 입자크기분포를 구한 것이다. 입자크기의 그룹을 7개로 하였을 때, 첫째 그룹의 입자가 가중치 1이고, 넷째 그룹의 입자의 가중치가 0.5, 그리고 나머지 크기그룹의 가중치가 모두 0 일 때, Hopfield신경회로에 의한 시간적 변화의 결과가 그림 9에 나타나 있다. 이러한 특정한 입자의 분포에 대하여, 각 입자크기군의 가중치는 Hopfield신경회로 미분방정식을 시간에 따라 풀었을 때의 다음 최종치와 같다.

- (1) 0.9930 (2) 0.0032 (3) 0.0000 (4) 0.4998
- (5) 0.0000 (6) 0.0000 (7) 0.0000.

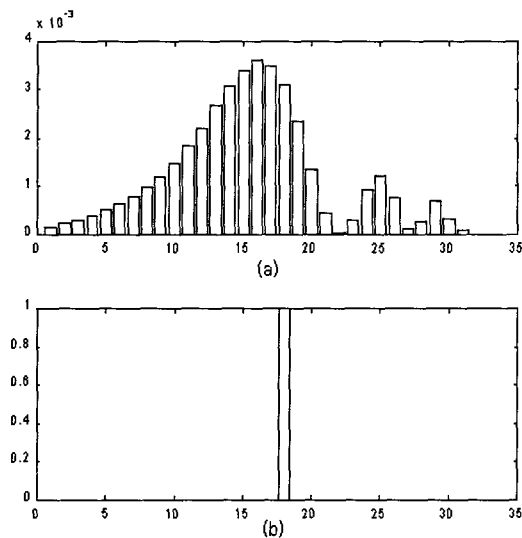


그림 8. 특정 입자의 가중치 분포.
Fig. 8. Weight distribution for particles.

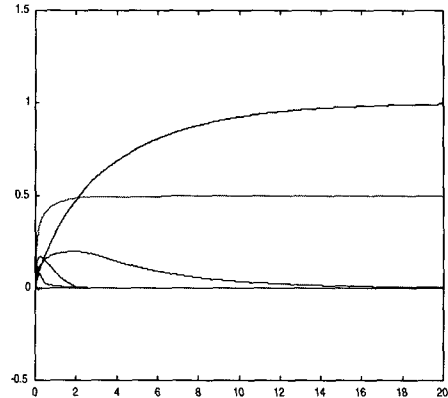


그림 9. 홉필드신경회로에 의한 크기분포
Fig. 9. Particle size distribution by hopfield neural network.

참고문헌

- [1] J. Swithenbank, J. M. Beer, D. S. Taylor, D. Abbott, and G. C. McCreath, "Laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distribution in experimental diagnostics in gas phase combustion systems," *Progress in Astronautics and Aeronautics Series*, edited by B. T. Zinn, AIAA, vol. 53, pp. 421-447, New York, 1977.
- [2] E. Dan Hirleman, V. Oechsle, and N. A. Chigier, "Response characteristics of laser diffraction particle size analyzers: optical sample volume extent and lens effects," *Optical Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 610-619, September/October, 1984.
- [3] J. A. Drallmeier and J. E. Peters, "Time-resolved pulsed spray drop sizing at elevated pressures," *J. Propulsion*, vol. 2, no. 2, pp.142-148, March/April, 1986.
- [4] K. W. Casewell, "Particle sizing by laser diffraction," Malvern Instruments Ltd., Malvern, Worcestershire, England.
- [5] Peter McFadyen, "Using lasers to measure particle size," Malvern Instruments Ltd., *Separation Techniques*, vol. 10, Issue 4, 1985.
- [6] Terry W. Alger, "Polydisperse particle size distribution function determined from intensity profile of angularly scattered light," *Applied Optics*, vol. 18, no. 20, pp. 3494-3501, 15, October, 1979.
- [7] D. G. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*, Addison Wesley, 1984.
- [8] A. Cichocki and R. Unbehauen, *Neural Networks for Optimization and Signal Processing*, John Wiley and Sons, 1993.
- [9] 남부희, 유태우, 지규인, 방병렬, 강성귀, "레이저 회절성을 이용한 입자크기 분포의 해석," *대한전기학회 논문지* vol. 42 no. 9, pp. 113-121, 1993. 9..



남 부 희

1950년 12월 2일생. 1974년 서울대학교 전기공학과(학사). 1976년 서울대학교 대학원(석사). 1976-1978년 울산공대 조교 및 전임강사. 1978-1980년 충남대학교 전임강사. 1983년 미국Iowa State University 전기공학과(Ph. D.). 1983년 9월~현재 강원대학교 전기전자정보통신공학부/제어계측공학과 교수. 1984년 IEEE Circuits and System Society Guillemin-Cauer Prize Paper Award(with A.N. Michel and R.K.Miller). 관심분야는 비선형제어, 신경회로, 자동화네트워크(필드버스), 웨이블릿응용.



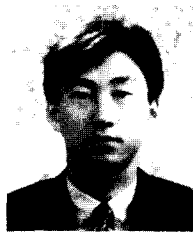
이 영 진

1970년 1월 7일생. 1998년 강원대학교 제어계측공학과(학사). 2000년 강원대학교 대학원(석사). 2000-현재 (주)미래산업 연구소 근무. 주요관심분야는 자동화 네트워크, 이동로봇, 신경회로망, Gateway for TCP/IP and fieldbus.



이 상 재

1969년 3월 11일생. 강원대학교 제어계측공학과 학사(1994) 및 석사(1996). 1997년~ 현재 (주)메디슨 근무 관심분야: Neural Network, Robot Control, Ultrasound Diagnostic System Design.



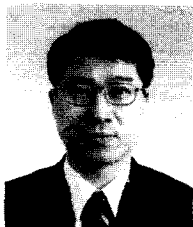
이 석 원

1969년 4월 1일생. 강원대학교 제어계측공학과 학사(1995) 및 석사(1997). 1997년~ 현재 강원대학교 제어계측공학과 박사과정. 관심분야는 소프트 모델, 웨이블릿 응용 (지문 인식), MPEG Audio, Gateway for TCP/IP and fieldbus, Mobile Robot.



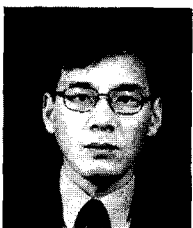
박 민 현

1974년 10월 5일생. 1998년 강원대학교 제어계측공학과(학사). 2000년 강원대학교 대학원(석사). 2000-현재 삼성전자 연구소 근무 주요관심분야는 영상신호처리, 웨이블릿응용.



류 태 우

1975년 연세대학교 기계공학과(학사). 1976년 연세대학교 대학원(석사). 1977-1978년 KIST 연구원. 1983년 IOWA 주립대학교 기계공학과(박사). 1983-1989년 MIT 에너지연구소 책임연구원. 1989-1990년 대우자동차. 1990-현재 한국생산기술연구원 수석연구원. 관심분야는 연소, 청정기술.



방 병 렬

1982년 연세대학교 기계공학과(학사). 1984년 한국과학기술연구원 기계공학과(석사). 1984-1989년 한국과학기술원 연구조교. 1992년 - 현재 생산기술연구원 선임연구원. 관심분야는 연소, 청정기술