

# 해상용 고사분수의 운동학적 특성 연구

이춘태\*

## A Study on the Kinematic Characteristics of the Ocean High Elevation Fountain

Choon-Tae Lee\*

Key Words : High elevation fountain(고사분수), Ejection trajectory(분사궤적), Nozzle(노즐), Particle model(입자모델)

### ABSTRACT

Recently, many high elevation fountain are constructed for the beauty of beach landscape. Typically, a fountain has several nozzles that shoots water upwards or at an angle into the air. But unfortunately, the weather and wind can cause the water soak nearby walkways and pedestrians. Therefore, in this study, a mathematical model of high elevation fountain is suggested to predict the actual travelling distance of water droplet by the wind. To simplify our treatment of the water flow and to avoid issues such as fluid dynamics and surface tension, we have adopted a particle model for the fountain water. The particles are assumed not to interact with each other, and do not deform during their flight through air

### 1. 서론

최근, 해변 경관을 장식하기 위하여 분사높이가 100m 이상인 고사분수(high elevation fountain)가 전국적으로 설치되고 있다. 이러한 해상용 고사분수는 해변에서 일정한 거리를 두고 해상에 설치되며 메인 노즐(main nozzle)은 높은 초기속도로 수직방향으로 분사되어 최고 높이에 도달하며, 주변의 나머지 분수 몇 개는 일정한 각도를 가지고 낮은 속도로 분사되어 메인분수를 장식하는 효과를 가지게 된다.

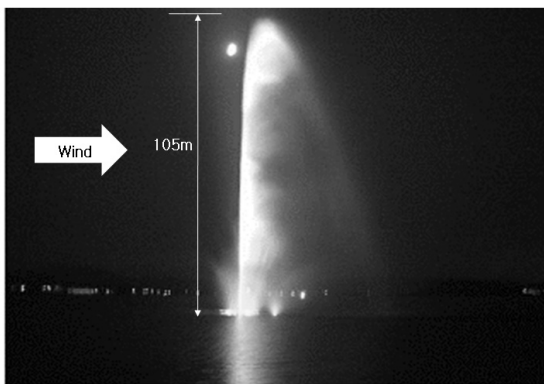


Fig. 1 The example of high elevation fountain

Fig. 1에 서해대교의 평택호에 설치된 최대높이 105m의 대표적인 고사분수의 예를 나타내었다.

해상용 고사분수는 Fig. 2와 같이 고압의 해수(sea water)를 뿜어주기 위한 펌프, 펌프를 구동하기 위한 전기모터, 분수의 유량을 조절하는 유량조절밸브 그리고 고압의 해수를 대기 중으로 분출시키는 노즐 등으로 구성되어 있다. 이러한 해상용 고사분수는 바닷물을 사용함으로써, 고속으로 쏘아진 바닷물 입자(droplet or mist) 중 일부가 바람에 날려 주변의 시설물과 사람들에게 피해를 줄 수도 있으므로 고가의 고사분수를 제작 및 설치하기 전에 이러한 문제를 검토하여

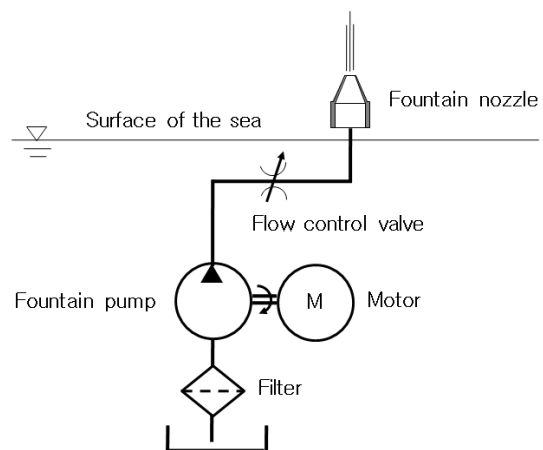


Fig. 2 A typical constitution of high elevation fountain system

\* 신라대학교 자동차기계공학과  
E-mail : charity@silla.ac.kr

야 한다.

따라서 바람에 의해 날려가는 바닷물 입자의 이동거리를 산출하여 고사분수의 설치 가능한 공간을 확보하는 것이 중요하다 하겠다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 분수 시스템에 대한 수학적 모델링을 실시하고, 바람의 세기에 따른 유체 입자의 이동거리를 산출하고자 한다. 이러한 고사분수에 대한 연구는 국내에서는 전무한 실정이며 해외를 중심으로 일부 연구<sup>1)</sup>가 진행 중에 있지만, 대부분 자동차용 디젤 엔진의 인젝트에 대한 연구<sup>2~5)</sup>가 주를 이루고 있다.

## 2. 고사분수용 노즐 특성 모델링

### 2.1. 고사분수용 노즐의 유동해석

고사분수 노즐의 유동특성을 해석하기 위하여 고사분수 노즐의 일반적인 형태를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 노즐이 파이프와 연결되는 노즐입구 부분을 위치 1로, 노즐출구 부분을 위치 2로 표시하였다. 노즐의 입구에서의 압력을  $P_1$ , 직경을  $d_1$ , 유속을  $V_1$ 이라고 하고, 노즐을 통과하는 유량을  $Q$ 로 표시하였다. 그리고 노즐의 출구에서의 압력을  $P_2$ , 직경을  $d_2$ , 유속을  $V_2$ 으로 표시하였다. 또한, 1과 2의 위치에서의 높이는  $z_1$ 과  $z_2$ 로 표시하였다.

노즐의 유동특성을 해석하기 위하여 1과 2 위치에 대하여 베르누이 방정식을 적용하면 노즐에서의 유동식은 식 (1)과 (2)와 같이 주어진다.

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z = \text{constant} \quad (1)$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2)$$

여기서, 1과 2지점의 높이 차를 무시할 수 있고, 노즐 출

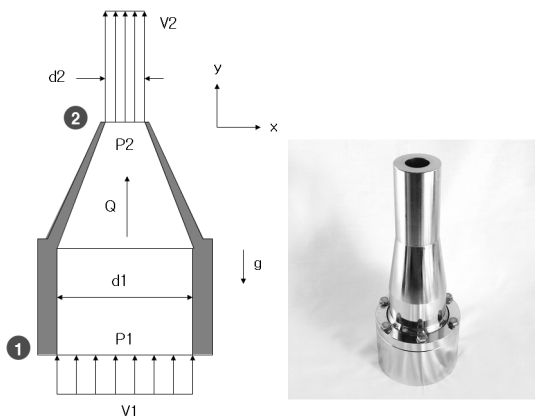


Fig. 3 General configuration and coordinate system of fountain nozzle

구에서의 압력은 대기압으로 고려할 수 있으므로 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 = \frac{\gamma}{2g} [V_2^2 - V_1^2] \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$ 는 유체의 비중량이다. 그리고 주어진 시스템에 대하여 연속방정식을 적용하면 유량  $Q$ 는 다음과 같다.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (4)$$

또한, 고사분수의 출구속도를 계산하기 위한 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서와 같이 분수에 의한 물줄기의 최대높이를  $h_{max}$ 로 나타내었고, 좌표계는 분수의 분출방향을  $+y$ 로 잡았다.

노즐을 통하여 분사된 물줄기에서의 압력은 대기압이 작용하므로  $P_2 = P_3 = 0$ 이 되고, 물줄기의 최대높이인 3의 위치에서는 속도가 0이므로  $V_3 = 0$ 의 조건이 된다. 그러므로 최대높이  $h_{max}$ 에 도달하기 위한 노즐출구에서의 분출속도는 식 (1)을 적용하면 다음과 같이 주어진다.

$$V_2 = \sqrt{2g(Z_3 - Z_2)} = \sqrt{2gh_{max}} \quad (5)$$

### 2.2 노즐설계

본 연구에서 사용한 조건은 최대 분사높이  $h_{max} = 100m$ , 유량  $Q = 7500l/min$ , 파이프 직경  $d_1 = 10cm$ 이다. 따라서 주어진 조건으로부터 노즐출구 속도, 노즐 직경, 펌프 토출압력을 계산하면 다음과 같다. 먼저 최고 분사높이 100m

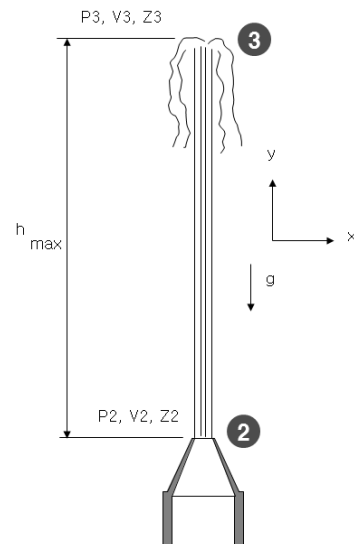


Fig. 4 General configuration of water ejection of the fountain

를 도달하기 위한 노즐출구 속도를 식 (5)를 이용하여 구하면  $V_2=45(\text{m/sec})$ 가 된다.

또한, 노즐의 출구직경을 구하기 위하여 식 (4)를 적용하면  $Q=A_2 V_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2 \times 45 = 0.125\text{m}^3/\text{sec}$ 가 된다.

따라서, 위식을 정리하면  $d_2=6\text{cm}$ 이다. 최종적으로, 위에서 주어진 형상을 가진 노즐을 이용하여 최고분사 높이 100m를 유지하기 위한 펌프 토출압력은 관로에서의 마찰 등에 의한 손실을 무시하면 식 (3), (4)를 이용하여 구할 수 있다. 즉,  $Q=0.007854(\text{m}^2) \times V_1(\text{m/sec}) = 0.125\text{m}^3/\text{sec}$  이므로  $V_1 \approx 16(\text{m/sec})$ 이다. 따라서  $P_1 = \frac{\gamma}{2g}[V_2^2 - V_1^2] = 8.5\text{bar}$ 이다.

### 3. 고사분수 분사궤적 해석모델

#### 3.1 고사분수 해석모델

아래의 Fig. 5에 본 연구에 사용된 고사분수의 모델을 나타내었다. 그림에서와 같이 고사분수의 메인 노즐의 설치높이는  $h$ 이고, 입자의 분사반경은  $r$ 로 표시하였다. 또한, 분수 물줄기는 수직방향으로  $\theta$ 의 방향을 가지고 분사되며 주변의 바람에 의해 영향을 받는다. 바람은 고도에 따라 일정한 크기를 가진다고 가정하였다. 즉, 임의의 시간에 분수 물방울에 가해지는 바람에 의한 힘은 항상 일정하다고 가정한다.

#### 3.2 수학적 모델링

본 연구에서는 분수에서 쏘아진 물줄기를 하나의 입자모델(a particle model of water flow)로 가정하여 그 궤적을 산출하였다. 즉, 분수의 물줄기를 하나의 물방울로 가정하였으므로 운동중인 유체입자 상호간의 간섭이나 운동중의 변형, 유체상호간의 표면장력 등을 고려하지 않아도 되어 문제가 간단해진다. 아래의 그림 Fig. 6에 분수의 분출 입자에 작용하는 힘을 나타내는 자유물체도(FBD)를 나타내었다.

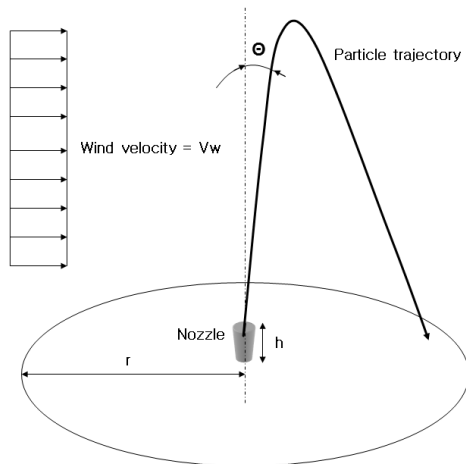


Fig. 5 A typical fountain setup

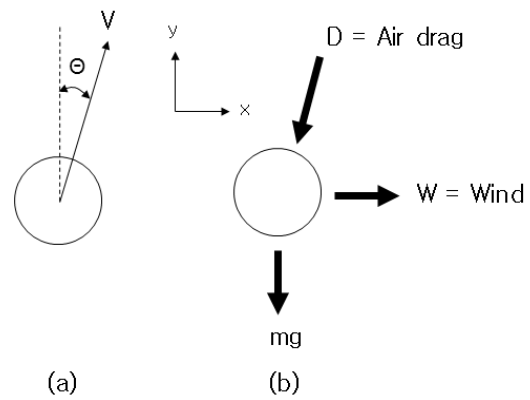


Fig. 6 (a) Schematic of a typical water particle moving with velocity  $V$ , (b) A free body diagram of the water particle.

그림에서와 같이 물방울에 작용하는 힘은 중력에 의한 힘 ( $mg$ )과 공기저항에 의한 힘( $D$ )과 바람에 의한 힘( $W$ )로 구성되어 있다. 여기서, 공기저항에 의한 힘은 입자가 움직이는 방향에 반대방향으로 작용하며 크기는 입자의 속도  $V(t)$ 에 비례하며 다음과 같이 주어진다.

$$D(t) = 6\pi\mu_r V(t) \tag{6}$$

여기서,  $r_p$ 는 입자반경,  $\mu$ 는 공기의 점성계수이다. 또한, 바람은 수평방향으로  $V_w$ 로 일정하므로, 항상 일정한 힘으로 작용한다. 따라서 바람에 의한 힘은 다음의 식으로 주어진다.

$$W = 6\pi\mu_r V_w \tag{7}$$

식(6)과 (7)에서, 항력식을 결정하기 위하여 유체입자의 Re수를 계산하면 6,125으로 중간 정도의 Re수 유동에 가까워  $C_D$ 가 일정한 값을 가지는 것이 타당하지만, 크리핑 유동(Stokes flow)으로 가정한 것은 3.2절의 수학적 모델링 과정에서 중간 정도의 Re수 유동으로 계산할 경우 항력이 속도의 제곱항( $V^2(t)$ )으로 표시되어 적분이 불가능해져 크리핑 유동으로 가정하였다.

#### 3.2.1 수직방향 운동 해석

유체 입자의 수직방향에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\sum F_y(t) = ma_y(t) \tag{8}$$

$$ma_y(t) = -mg - 6\pi\mu_r V_y(t) \tag{9}$$

위 식을 초기조건  $V_y(0) = V_0 \cos\theta$  (단,  $V_0$ 는 노즐분사 초기 속도)을 적용하여 계산하면 수직방향의 속도는 다음과 같이

주어진다.

$$V_y(t) = \frac{\exp(-\frac{6\pi\mu_r t}{m})(6\pi\mu_r V_0 \cos\theta + mg) - mg}{6\pi\mu_r} \quad (10)$$

또한, 수직방향의 변위는 초기조건  $S_y(0) = h$ (노즐의 높이)를 적용하면 다음과 같이 계산되어 진다.

$$S_y(t) = \frac{-\exp(-\frac{6\pi\mu_r t}{m})[6\pi\mu_r m V_0 \cos\theta + m^2 g]}{(6\pi\mu_r)^2} + \frac{-6\pi\mu_r mgt + m^2 g + 6\pi\mu_r m V_0 \cos\theta + (6\pi\mu_r)^2 h}{(6\pi\mu_r)^2} \quad (11)$$

### 3.2.2 수평방향 운동 해석

수평방향의 운동해석은 수직방향 운동해석에서와 같이 자유물체도로부터 다음과 같은 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$\sum F_x(t) = ma_x(t) \quad (12)$$

$$ma_x(t) = 6\pi\mu_r V_w - 6\pi\mu_r V_x(t) \quad (13)$$

수직방향의 운동해석에서와 같이 식 (13)과 초기조건  $V_x(0) = V_0 \sin\theta$ 를 이용하면 다음과 같은 시간에 따른 수평방향의 속도  $V_x(t)$ 를 구할 수 있다.

$$V_x(t) = -(V_w - V_0 \sin\theta) \exp(-\frac{6\pi\mu_r t}{m}) + V_w \quad (14)$$

그리고 수평방향의 이동거리는 초기조건  $S_x(0) = S_{x0}$  라고 놓으면 다음과 같이 주어진다.

$$S_x(t) = \frac{m(V_w - V_0 \sin\theta) \exp(-\frac{6\pi\mu_r t}{m})}{6\pi\mu_r} + \frac{6\pi\mu_r V_w t}{6\pi\mu_r} + \frac{m(V_w - V_0 \sin\theta) + 6\pi\mu_r S_{x0}}{6\pi\mu_r} \quad (15)$$

## 4. 고사분수 분사궤적 해석

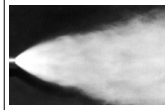
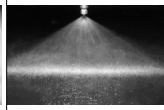

### 4.1 분사궤적 해석 조건

본 연구에서 고사분수의 분사궤적을 계산하기 위해 사용한 파라미터는 Table 1과 같다. 초기 분사속도와 유압펌프의 필요압력은 2.2에서 구한 값을 사용하였고, 기타 노즐 형상 등의 데이터는 앞에서 설명한 설계조건을 사용하였다. 또한 바람의 영향을 검토하기 위하여 일반적으로 해변에서의 풍

Table 1 Simulation parameters

Parameter	unit	Value
Maximum height $h_{max}$	m	100
Flow rate $Q$	liter/min	7500
Exit velocity of nozzle $V_0$	m/sec	45
Diameter of nozzle $d_2$	cm	6
Pressure of pump $P$	bar	8.5
Radius of particle $r_p$	mm	0.01~1
Mass of particle $m$	kg	4.19e-6
Absolute viscosity of air $\mu$	kg/(m sec)	1.798e-5
Velocity of wind $V_w$	m/sec	0~5

Table 2 Various size of water droplet

	Mist	Droplet	Water jet
Size(Radius)	2~10 $\mu$ m	50~500 $\mu$ m	1mm~
Example			

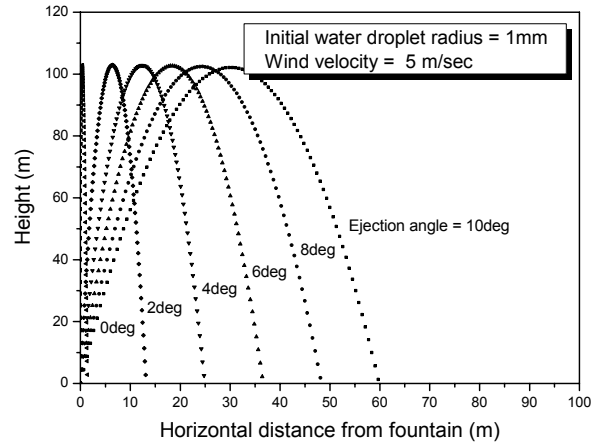


Fig. 7 Simulation result of droplet trajectory

향을 고려하여 0~5m/sec의 바람속도를 설정하였다. 일반적으로 이 이상의 속도에서는 바람에 의한 물방울의 비산을 방지하기 위하여 고사분수의 작동을 정지하므로 적절한 범위라고 사료된다.

### 4.2 분사궤적 해석 결과

분사궤적 해석을 위하여, 유체 입자는 Table 2에서와 같이 대표적인 유체입자의 크기를 고려하여 반경 1mm의 물방울로 가정하였다.

바람의 속도를 5m/sec로 가정하고 노즐의 분사각도를 0 deg에서 10deg까지 2deg 간격으로 변화 시켰을 때의 분수의 궤적을 계산한 결과를 아래 그림 Fig. 7에 나타내었다. 계

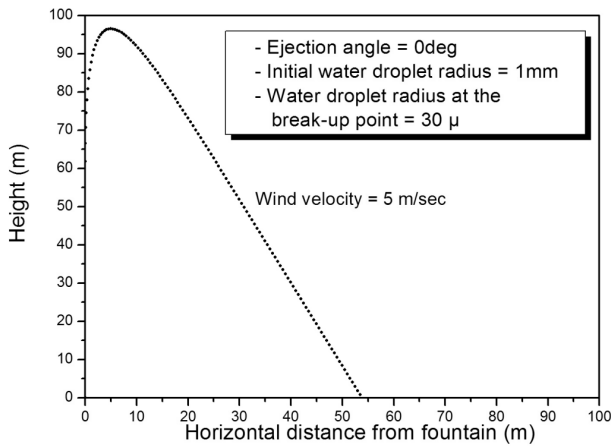


Fig. 8 Simulation result of droplet trajectory using break-up model

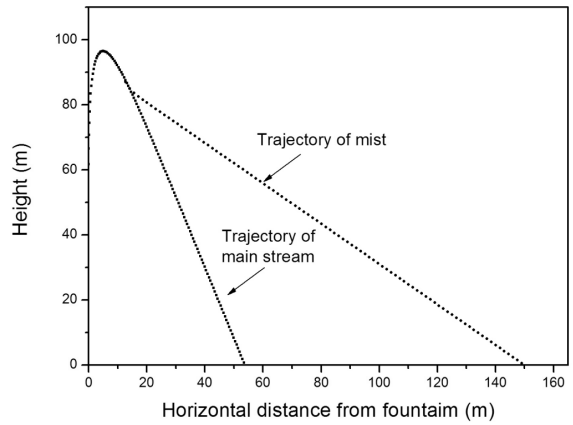


Fig. 10 Trajectory of mist using break-up model

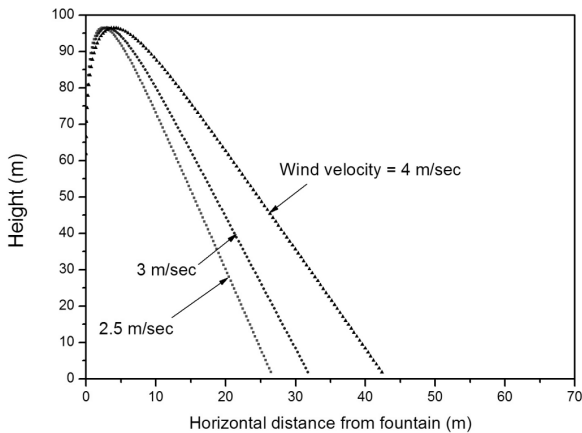


Fig. 9 Influence of wind velocity for the droplet trajectory

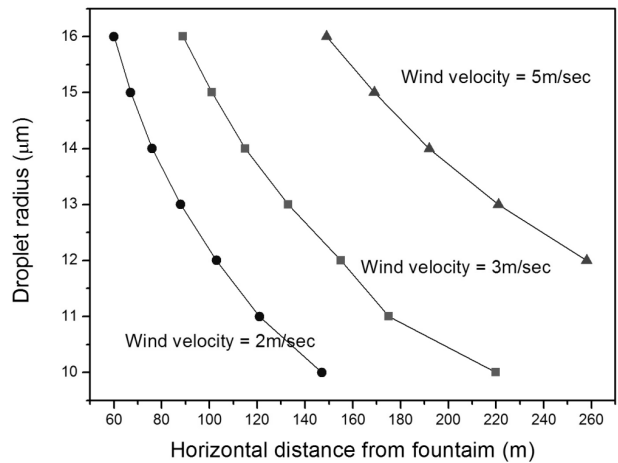


Fig. 11 Influence of wind velocity for the trajectory of mist using break-up model

산결과 10deg 분출각도에서는 약 60m의 수평거리를 나타 내었지만, 실제의 고사분수의 경우 노즐의 분사각도는 수직 방향(0deg)으로 고정되어 있다. 그런데, 해석결과에서 나타 난 0deg에서의 분수 궤적은 Fig. 1에서 나타난 일반적인 분 수의 궤적과는 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 실제와 유사한 고사분수의 궤적을 구현하기 위하 여 분사 입자의 분열모델(break up model)을 검토하였다. 본 연구에서는 분사된 물줄기가 1deg 이상 기울어지는 지점 에서 분열하여 입자의 크기가 30 $\mu$ m으로 분열된다고 가정 하였다. 이러한 가정 하에 수행한 해석결과를 Fig. 8에 나타 내었다.

다음으로 실제 고사분수가 설치될 장소의 기상조건을 고 려한 해석을 실시하였다. 즉 해변이 위치한 북쪽 방향으로 각각 풍속 2.5m/sec, 3m/sec, 4m/sec의 경우에 대하여 해 석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서와 같이 대표적 인 분수 궤적의 바람에 대한 영향은 풍속 2.5m/sec일 때 약 27m, 3m/sec일 때 32m, 4m/sec일 때 43m인 것으로 나타났다.

그리고 본 연구에서는 비교적 멀리까지 해수의 영향을 미

치는 분무상 입자(mist)를 대상으로 풍속에 따른 최대 이동 거리를 예측하였다. 본 연구에서 분무상 입자는 최고높이에 도달한 후, 낙하하여 최고도달 높이의 약 10%에서 분리되어 이동하는 것으로 가정하였다. 또한, 고사분수는 해안로부터 150m 지점에 설치하는 것으로 하였다. 이와 같은 조건으 로 10 $\mu$ m 크기의 분무상 입자가 풍속 2m/sec인 경우의 이 동거리를 해석한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

또한 Fig. 11에 분무상 입자크기와 풍속에 따른 이동거리 의 관계를 나타내었다. 그림에서와 같이 풍속 2m/sec인 경 우 반경 10 $\mu$ m 이하의 입자가 해변에 도달하고, 풍속 3 m/sec인 경우 반경 12 $\mu$ m 이하의 입자가 해변에 도달하였 다. 또한, 풍속 5m/sec인 경우는 반경 16 $\mu$ m 이하의 입자 가 해변에 도달하는 것으로 나타났다.

해석 결과, 분무상 입자에 의한 이동거리는 비교적 큰 것 으로 나타났지만 고사분수에서 발생하는 분무상 입자는 대 부분 본류(main stream)의 물줄기에 묻혀 사라지거나, 무게 가 가벼워 공기 중으로 비산되어 사라지고 실제로 바람에 실 려 육지까지 이동하는 입자는 그리 많지 않은 것으로 판단된

다. 따라서 이론적으로는 분무상 입자가 일정거리 이상 날아가는 것으로 나타나지만 실제의 경우 그 영향은 매우 적을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이상과 같이 해상용 고사분수의 핵심부품인 노즐과 분사노즐을 통한 유체의 궤적을 대상으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구를 통하여 고사분수의 핵심부품인 노즐을 설계할 수 있는 이론식을 제시하였고 실제 고사분수에서 분출된 유체입자의 운동궤적과 유사한 수학적 모델을 제시하였다.
- 2) 또한, 본 연구에서 제시한 모델을 이용하여 바람에 의한 분무상 입자의 이동거리를 계산할 수 있어, 해수에 의한 주변의 영향을 예측할 수 있는 자료를 제시하였다.

따라서 본 연구는 국내에서는 아직 미개척 분야인 고사분수의 설계 및 시공에 중요한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- (1) Borong Lin, Zhiqin Zhang, Xiaofeng Li and Yingxin Zhu, 2007, "Numerical Simulation Study on the Effects of Fountain on Around Thermal Environment," Proceedings : Building Simulation 2007, pp. 23~30.
- (2) M. M. Clark, 1988, "Drop Breakup in a Turbulent Flow-1. Conceptual and Modeling Considerations," Chemical Engineering Science, Vol. 43, No. 3, pp. 671~679
- (3) T. Dan, S. Takagishi, J. Senda, and H. Fujimoto, 1997, "Organized Structure and Motion in Diesel Spray," SAE 970641.
- (4) J. E. Eckhause and R. D. Reitz, 1995, "Modelling Heat Transfer to Impinging Fuel Sprays in Direct-Injection Engines," Atomization and Spays, Vol. 5, pp. 213~242.
- (5) C. J. Rutland, J. Eckhause and R. D. Reitz, 1994, "Toward Predictive Modeling of Diesel Engine Intake Flow, Combustion and Emissions," SAE 941897.