

# 해상 소형 낙하물 입수흔적의 크기 예측 및 검증

민안기<sup>\*,1)</sup> · 황태원<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제1기술연구본부

## Prediction and Verification of Water-entry Traces Size of Small Falling Objects into the Sea

Anki Min<sup>\*,1)</sup> · Tae-Won Hwang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 25 July 2014 / Revised 19 December 2014 / Accepted 27 February 2015)

### ABSTRACT

An unmanned aerial photography method by using an unmanned helicopter is useful method for measuring of the water-entry traces of small falling objects into the sea. Pixel sizes on the aerial photograph may be too large due to a limit of camcorder resolution and a wide shooting area. If the pixel size is too large, identification of water-entry trace is impossible. Thus an accurate prediction of water-entry trace size is required. The traces of water-entry could be classified into three types such as splash, water column, and bubble. Diameters of each trace are predicted by water-entry impact pressure theories, cavity theories, and trial test results. The results are verified by drop tests using an unmanned helicopter at two water-entry speeds. As a result, prediction and test results showed sufficient similarity to evaluate the identifiability of water-entry trace.

Key Words : Traces of Water-entry(입수 흔적), Unmanned Aerial Photography(무인항공촬영), Small Falling Object(소형 낙하물)

### 1. 서론

포탄이나 보급품 등의 항공기에서 투하하는 낙하물의 정확한 낙하위치 파악은 시험평가 및 낙하위치 예측과 그 결과의 활용 측면에서 매우 중요하다. 이러한 낙하물의 정확한 낙하위치를 파악하는 방법은 여러 가

지가 있다. 특히 흔적이 크게 나타나는 실탄이나 지상에 낙하하는 낙하물의 경우는 일반적인 지상촬영기법이나 낙하물의 폭발흔적, 낙하물의 수거 등을 통해 낙하위치를 비교적 쉽게 파악할 수 있다. 하지만, 낙하물의 크기가 작거나 폭발력 등이 없어 낙하흔적이 작고, 해상에 낙하하는 경우는 이러한 방법들로 낙하위치를 파악하기 어렵다. 이러한 경우 낙하위치를 파악할 수 있는 방법은 낙하물에 위치추적장치를 장착하는 방법, 낙하 후 염료를 방출하는 방법, 입수흔적을

\* Corresponding author, E-mail: akmin@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

과악하는 방법 등이 있다. 이 중에서 낙하 후 염료를 방출하는 방법은 염료가 조류와 파도에 쓸려가므로 조류와 파도가 아주 약한 일부 지역에서만 사용할 수 있다. 그리고 낙하물에 위치추적장치를 장착하는 방법은 낙하물의 크기가 작거나 그 개수가 많을 때는 위치추적장치의 장착이 어렵고, 위치추적장치로 GPS 등을 사용할 경우 수 미터 이상의 오차가 발생한다. 따라서 해상 소형 낙하물의 입수흔적을 파악하는 방법이 적용가능성 면에서 낙하물의 낙하위치를 파악하는 현실적인 방법이다. 입수흔적을 파악하는 가장 간단한 방법은 영상촬영기법이지만, 일반적인 지상촬영방법들은 촬영장소 및 입수흔적의 크기 확보 등의 한계가 있다. 낙하위치 주변에 지상촬영이 가능한 육지나 섬이 없는 경우나, 바람 등의 영향으로 낙하예상지점의 오차가 큰 경우에는 충분한 촬영거리 및 촬영영역을 확보할 수 있는 항공촬영이 적합하다. 하지만 이 방법은 촬영장비의 해상도 한계로 인한 시인성의 문제가 발생한다. 충분한 시인성 확보를 위해서는 촬영장비의 높은 해상도와 입수흔적의 크기 확보가 필요하다. 본 논문에서 적용한 촬영장비는 일반적인 Full-HD급 해상도의 캠코더이며, 촬영영역의 크기에 따라 픽셀 당 수 센티미터에서 수십 센티미터의 해상도를 확보할 수 있다. 낙하위치의 정확한 예측이 어렵거나 넓은 구간에 걸쳐 낙하하는 낙하물의 촬영을 위해서 수백 미터 이상의 촬영영역이 필요한 경우에는 픽셀 당 수십 센티미터의 해상도를 갖게 된다. 이러한 경우 입수흔적의 크기가 픽셀당 해상도보다 커야 시인성을 확보할 수 있다. 본 논문에서는 시인성 확보가 어려운 수백 미터의 촬영영역에 대해 Full-HD급 해상도의 촬영장비를 사용한 입수흔적의 촬영 가능성을 판단하고 입수흔적의 예측 크기를 제시하고자 한다. 입수흔적의 예측을 위해 입수흔적에 영향을 미치는 변수들을 조사하고, 입수흔적의 종류를 나누어 각 종류별 입수흔적의 크기를 추정한다. 예측한 결과는 무인헬기를 이용한 항공촬영을 통해 종단속도와 종단속도를 초과하는 속도로 입수하는 낙하물의 입수흔적을 획득 및 분석하여 검증한다.

## 2. 모의 낙하시험(교량 낙하시험)

### 2.1 입수흔적에 영향을 미치는 변수 예측

낙하물이 종단속도로 낙하하여 해수면에 입수하는

과정은 별도의 시험장비를 개발하지 않는 한 직접적인 재현이 어렵다. 본 논문에서는 별도의 시험장비 없이 단순한 자유낙하시험을 통해 종단속도에서의 입수흔적의 특성 및 이에 영향을 미치는 변수들을 파악하고자 한다. 모의 낙하시험에서 입수흔적에 영향을 미치는 변수로 예측한 것은 낙하물의 형상과 입수 시의 속도, 그리고 운동에너지이다. 낙하물의 형상은 실제 낙하물과 동일한 형상의 모형을 사용하므로 입수흔적에 영향을 미치지 못한다. 가장 문제가 되는 것은 낙하속도로, 충분한 낙하거리가 확보되지 않는 이상 종단속도에 도달하지 못한다. 이를 보완하기 위해 운동에너지를 추가적인 변수로 활용하여 낙하물의 입수에너지를 실제 낙하물의 낙하 시와 최대한 유사한 수준까지 시험한다. 낮은 낙하속도에서 운동에너지를 높이기 위해 실제 낙하물보다 질량만 증가된 모형을 추가 제작하여 시험을 수행하였다.

### 2.2 시험 방법

특별한 시험장비 없이 자유낙하시험을 하기에 적합한 장소로 교량을 선택하였다. 교량의 높이는 2가지를 선정하였는데, 하나는 세종시에 위치한 높이 약 20 m의 금남교이고 다른 하나는 충북 단양에 위치한 높이 약 53 m의 적성대교이다. 교량의 높이는 하천의 수위에 따라 달라지므로 시험에 앞서 추를 매단 낚시줄을 이용해 교량의 높이를 측정하였다. 그리고 입수흔적의 크기는 입수 장면의 동영상 촬영 시, 수면 높이에 매달아 놓은 30 cm 크기의 기준 표적을 함께 촬영하여 픽셀의 크기 비교를 통해 측정하였다.

### 2.3 시험 방법

실제 낙하물의 종단속도 및 운동에너지와 2개의 교량에서 낙하하는 모형 낙하물의 입수속도 및 운동에너지는 Table 1과 같다.(Table 1의 입수속도는 공기저항을 고려한 자유낙하 식을 사용하여 계산한 결과이며, 실제 낙하물의 질량을 M으로 표기한다.) 실제 낙하물의 종단속도는 44 m/s이고, 이때의 운동에너지는 276.8 J이다. 앞서 언급한 바와 같이 교량 높이 20 m와 53 m에서 자유낙하 시 모두 종단속도에 도달하지는 못하지만, 운동에너지는 질량이 증가(2.2 M)된 모형으로 높이 53 m의 교량에서 낙하할 경우 실제 낙하물의 입수 시의 운동에너지와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

Table 1. Terminal & test conditions

Height (m)	Mass	Speed (m/s)	Kinetic energy (J)
∞	M	44.0	276.8
20	M	18.8	49.9
53	M	28.4	117.0
	2.2M	31.0	301.9

모의 입수시험 결과, 입수흔적은 다음과 같은 3가지로 나타났다. 하나는 입수충격으로 인해 발생하는 물의 튀(Splash) 현상이고, 나머지는 입수 시 발생하는 공동(Cavity)에 의해 발생하는 물기둥(Water column)과 기포(Bubble) 퍼짐현상이다. 이러한 현상들을 교량 낙하시험(53 m, 2.2 M)에서 직접 촬영한 사진이 Fig. 1이다.

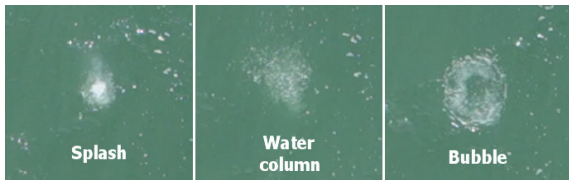


Fig. 1. Traces of water-entry(h = 53 m)

이러한 입수흔적들의 원인은 입수충격과 공동현상의 2가지로 볼 수 있다. 입수 초기에 낙하물이 수면으로 입수하면서 낙하물이 진행하는 유체가 공기에서 물로 바뀌게 된다. 이 순간에 낙하물과 수면의 충격이 발생하여 낙하물은 순간적인 감속 및 구조적인 충격 하중을 받고, 유체인 물은 충격력에 의해 사방으로 비산한다. 비산하는 물의 일부가 수면 위쪽 방향으로 비산하여 물의 튀 현상을 발생시키는데, 그 비산거리(물의 튀 직경)는 입수 충격에 의해 발생하는 힘인 입수 충격력에 비례한다. 낙하물은 이후로도 계속해서 물을 가르고 지나가면서 공기를 끌고 들어가 공동을 발생시킨다. Fig. 2와 같이 낙하물의 입수에 의해 발생된 공동은 상하 2개로 나뉘지는데 위쪽의 공동은 물기둥을 발생시키고 아래쪽의 공동은 기포 현상을 발생시킨다.

Table 1의 조건에 대한 모의 낙하시험의 시험결과가 Table 2로, Table 2의 각 입수흔적의 최대 직경을 입수흔적별로 비교분석한다. 먼저 물의 튀 현상은 낙하물

이 입수하는 순간에 나타나는 현상으로, 가장 선명하게 촬영이 가능하지만 그 직경이 가장 작다. 물의 튀 현상의 경향성은 입수속도의 변화경향성과 유사하며, 앞서 언급한 바와 같이 물의 튀 현상은 입수충격과 관계되므로 충격량 계산을 통해 예측이 가능하다. 다음으로 물기둥 현상은 물의 튀 현상에 바로 이어서 발생하는 현상으로, 높이 20 m의 교량에서 낙하 시에는 옆으로 퍼지는 물의 양이 적어 직경을 측정하기 어렵다. 높이 53 m의 교량에서 낙하 시에는 물의 튀 현상보다 큰 직경이 측정되나 크게 분산되어 식별이 어려울 것으로 판단된다. 마지막으로 기포 현상의 경우 낙하물이 끌고 들어간 기포가 상승할 때까지 시간이 걸리므로 물기둥 현상이 관측된 후 약 1~2초 후에 나타난다. 기포 현상에 의한 입수흔적은 물의 튀 현상에 비해 흐릿하게 관측되지만, 그 직경이 가장 크므로 무인헬기를 이용한 영상촬영에서의 시인성이 가장 크다.

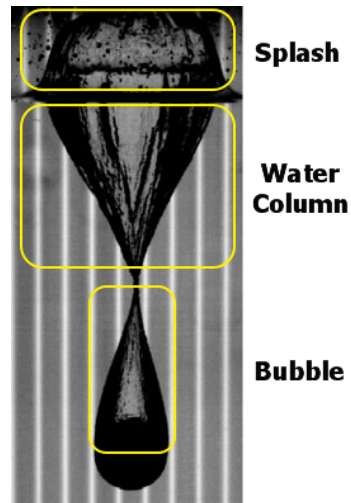


Fig. 2. Sources of each trace

Table 2. Traces of water-entry

Height (m)	Mass	Max. Diameter (m)		
		Splash	Water column	Bubble
20	M	0.130	-	0.457
53	M	0.273	0.409	0.518
	2.2 M	0.300	0.436	0.545

### 3. 입수흔적(직경)의 예측

#### 3.1 물의 튼 직경의 예측

입수 충격력이 주원인인 물의 튼 현상을 실제 낙하물의 낙하속도에서 예측하기 위해 입수 충격력을 계산한다. 입수 충격에 대한 문제는 최초로 Von Karman<sup>[1]</sup>에 의해 정식화되었다. Von Karman의 모멘텀 이론은 물체가 입수할 때 모멘텀의 일부가 주위의 물에 분배되어 그 전단율에 의해 충격력을 산정하고, 선박의 단면과 유사한 썩기형상에 적용하기 위해 부가질량의 개념을 도입하였다. 이후 Wagner<sup>[2]</sup>에 의해 수정되어 그 후의 연구들은 주로 이 두 논문을 참고하고 있다. 이후의 연구들은 썩기 또는 원뿔 형상의 2차원 입수 문제가 대부분이었는데, Boef<sup>[3]</sup>, Arai<sup>[4]</sup> 등은 구멍정의 자유낙하 진수 시의 충격에 대한 연구들을 수행하였고, 이들을 이용하여 어뢰 등의 다른 형상들에 대한 연구들도 진행되었다. Payne<sup>[5]</sup>이 Von Karman의 연구 결과에 대한 수정이 충격력 추정의 개선을 가져오지 않는다고 주장하였고, 본 연구에서도 입수 충격력의 정확한 계산이 요구되는 것이 아니라 입수 속도에 대한 입수 충격력의 경향성을 이용해 입수 속도에 대한 물의 튼 직경을 예측하는데 목적이 있다. 따라서 복잡한 수치해석적인 방법을 사용하지 않고 가장 기초적인 Von Karman의 입수충격압력을 사용한다.

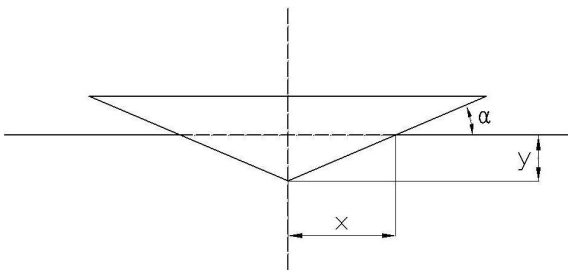


Fig. 3. Geometry model of water-entry

Von Karman이 정리한 수직으로 입수하는 썩기형의 물체의 표면에 작용하는 최대 충격압력( $P_{max}$ )은 아래의 식 (1)과 같다.

$$P_{max} = \frac{\rho V_o^2}{2} \pi \cot \alpha \quad (1)$$

여기에서  $\rho$ 는 물의 밀도이며,  $V_o$ 는 입수속도,  $\alpha$ 는

썩기각이다. 입수충격력의 간단한 계산을 위해 낙하물의 형상을 원통형으로 가정하면 썩기각은 0도이다. 썩기각이 0도이면 코탄젠트 값( $\cot \alpha$ )이 무한대가 되지만, 충격력의 직접적인 계산이 목적이 아니므로  $\cot \alpha$ 를 단순히 상수항으로 보고 충격압력이 입수속도의 제곱( $V_o^2$ )에 비례함을 이용한다. 그 근거로 Lee<sup>[6]</sup>의 연구결과를 들 수 있다. Lee는 형상각(썩기각) 및 낙하높이의 변화에 따른 충격압력 실험을 통해 낙하높이(입수속도)에 대한 충격압력의 경향성이 형상각 0도( $\alpha = 0$ )일 때와 형상각이 0도가 아닐 때가 유사함(형상각과 관계없이 낙하높이에 대한 충격압력분포 곡선의 기울기는 비례함)을 보여주었다. 입수면에 작용하는 충격압력이 낙하물의 아랫면에 모두 작용한다고 가정하면 충격력( $F$ )은 식 (2)와 같이 충격압력( $P$ )에 낙하물의 단면적( $A = \pi D^2/4$ )을 곱한 값이 된다.

$$F = PA = P \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

단면적이 변하지 않는 경우, 충격력은 입수속도의 제곱( $V_o^2$ )에 비례하므로 Table 2의 물의 튼 직경들을 입수속도에 대한 2차 보정식으로 표현하여 종단속도에서의 물의 튼 현상의 직경을 예측한다.

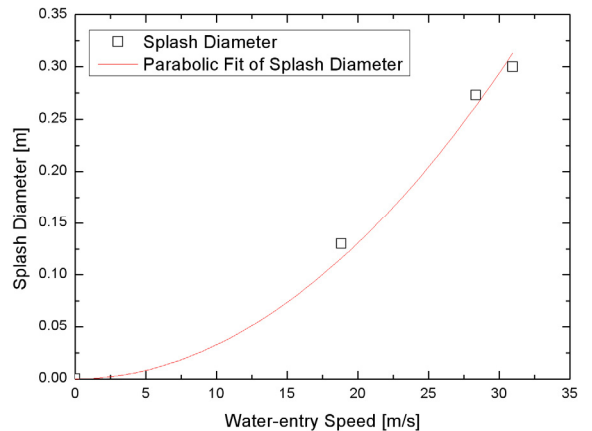


Fig. 4. Splash diameters

입수속도가 0 m/s일 때의 물의 튼 직경은 0 m이므로 Fig. 4와 같이 3개의 시험결과를 포함한 총 4개의 자료를 이용한다. 시험결과를 이용해 계산한 물의 튼 직경( $D_{splash}$ )의 입수속도( $V_o$ )에 대한 2차 보정식은 식

(3)과 같다.

$$D_{splash} = 0.00033 V_o^2 \quad (3)$$

그리고 식 (3)을 이용해 예측한 중단속도 44 m/s에서의 물의 튜 직경은 0.639 m이다.

### 3.2 기포 퍼짐 직경의 예측

입수하는 물체에 의한 공동에 의해 발생하는 현상은 물기둥과 기포 현상이다. 물기둥 현상은 앞서 언급한 바와 같이 수직방향의 항공촬영에서 식별하기 어려워 예측하지 않는다. 기포 현상은 낙하물이 끌고 들어간 기포의 크기(2개로 나뉜 공동 중 아래 부분의 부피)에 비례할 것으로 판단된다. 수직으로 입수한 구의 공동 길이에 대한 기존의 실험적인 연구를 이용해 기포 퍼짐 직경을 예측한다. V. Duclaux<sup>[7]</sup> 등은 실험적인 연구를 통해 수직으로 입수한 구형 및 원통형 강체의 프루드 수(Froude number,  $Fr$ )에 대한 공동의 길이 변화를 간단한 식으로 정리하였다.

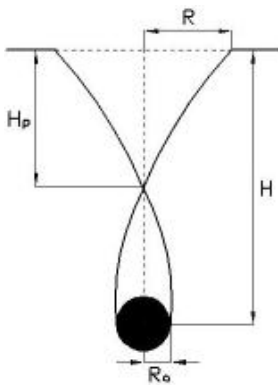


Fig. 5. Characteristics of cavity

V. Duclaux 등은 Fig. 5와 같이 공동의 길이와 입수면에서의 직경에 대해서 정리하였는데, 구형 강체에 대한 식은 다음과 같다.

$$Fr = V_o^2 / (gR_o) \quad (4)$$

$$H/R_o = \sqrt{(8\sqrt{\alpha})Fr} \quad (5)$$

$$R/R_o = 2^{(5/4)} \alpha^{(3/8)} Fr^{(1/4)} \quad (6)$$

$$H_p/H = 1/2 \quad (7)$$

여기에서  $g$ 는 중력가속도이며,  $\alpha$ 는 입수하는 강체의 특성에 관계된 상수로, 강체의 재질, 형상 등에 따라 달라진다. 원통형 강체의 경우 상수  $\alpha$ 는 0에 가까운 값을 갖는데, 낙하물을 원통형으로 가정했으므로 상수  $\alpha$ 를 0으로 가정한다.  $\alpha = 0$ 일 때의 식은 다음과 같이 별도로 정리한다.

$$H/R_o = (27/4 Fr)^{1/3} \quad (8)$$

$$R/R_o = 1 \quad (9)$$

$$H_p/H = 1/3 \quad (10)$$

기포 현상을 발생시키는 아래쪽 공동은 원통형의 강체가 입수한 경우 공동이 분리되는 시점에서 원뿔에 가까운 형상을 가지므로 원뿔형으로 가정하고 기포의 부피를 계산한다. 이러한 기포들이 수면에서 균일하게 일정한 두께의 원형으로 퍼진다고 가정하여 기포 퍼짐 현상의 직경을 예측한다. 먼저 Table 2의 시험결과와 식 (8), 식 (10)을 이용해 계산한 기포의 부피와 두께를 보면 Table 3과 같다.

Table 3. Dimensions of bubble(Experiments)

Mass	Speed (m/s)	Dimeter (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Thick. (m)
M	18.8	0.457	6.9379 × 10 <sup>-3</sup>	0.04230
M	28.4	0.518	9.1126 × 10 <sup>-3</sup>	0.04324
2.2M	31.0	0.545	9.6614 × 10 <sup>-3</sup>	0.04142
Average of Bubble Thickness				0.04232

Table 3의 결과를 보면 기포의 평균 두께는 약 0.04232 m이고, 앞의 가정(기포가 균일하게 일정한 두께의 원형으로 퍼진다.)에 의해 평균 두께는 기포의 평균 직경이라 할 수 있다. 이 결과를 중단속도에 적용하기에 앞서 담수와 해수에서의 기포의 직경 차이

를 고려해야 한다. 해수와 담수에서 발생하는 기포의 직경 차이에 대한 연구들이 진행되어 왔고, 각 연구들은 기포의 발생 방법에 있어 다소 차이가 있다. 본 논문에 적용할 연구는 M. Perlin<sup>[8]</sup> 등의 연구이다. 이 연구는 벽면에서 주입한 공기를 이용해 기포의 크기를 측정한 시험으로, 기포의 발생방법이 본 논문과 다소 차이가 있다. 하지만 발생된 기포의 실제 크기를 적용하는 것이 아니라 담수와 해수의 기포 직경비를 적용하는데 목적이 있으므로, 기포의 직경 변화에 가장 큰 변수는 기포의 발생방법이 아니라 염도이다. M. Perlin 등의 연구는 염도에 대한 기포 직경의 시험결과를 제공(Table 4)하므로 시험지역에 대해 타 연구들보다 정확한 정보를 사용할 수 있다.

Table 4. Bubble diameter ratio(tap water/Seawater)

Salinity	9 %	19 %	33 %	38 %
Bubble dia. ratio	1.101	2.531	4.161	4.345

일반적으로 해양표층수의 염도는 35 %이나, 지역마다 차이가 있다. 서해의 경우 평균 약 33 %의 염도를 가지고 있으므로, 담수와 해수의 기포 직경비는 약 4.161이다. 따라서 해수의 기포 직경은 담수에 비해 약 1/4 수준인 0.01017 m이다. 이를 적용하여 종단속도에서의 기포의 크기를 계산한 결과가 아래의 Table 5이다.

Table 5. Dimensions of bubble(Prediction)

Mass	Speed (m/s)	Volume (m <sup>3</sup> )	Thick. (m)	Dimeter (m)
M	44.0	1.2213 × 10 <sup>-2</sup>	0.01017	1.236

Table 5의 예측 결과, 종단속도인 44 m/s에서의 기포 퍼짐의 직경은 약 1.236 m로, 물의 튀 직경보다 약 1.94배 크다.

#### 4. 무인헬기를 이용한 낙하물의 촬영

##### 4.1 종단속도로 입수하는 낙하물

무인항공촬영은 Full-HD급(1920×1080/60p) 해상도의

캠코더와 낙하물 투하장치를 장착한 무인헬기를 이용한다. 실제 낙하고도와 같은 고도에서 정지비행하고 있는 무인헬기에서 낙하물 투하장치를 이용하여 낙하물을 투하해 바다에 입수시킨다. 그리고 입수장면은 무인헬기에 장착된 캠코더의 동영상 촬영 기능을 이용해 촬영한다. 본 시험에서는 500 m의 고도에서 낙하물을 투하하고, 무인헬기의 고도를 유지한 상태에서 입수장면을 촬영한다. 캠코더는 직하방향의 세로(1,080 픽셀) 약 215 m 해상영역(1픽셀 당 0.20 m)을 촬영하도록 줌을 조정하였다. 실제 입수장면의 촬영에 앞서, 배경색과의 대비에 의한 빛 산란 효과를 확인하기 위해 한 변이 30 cm인 정사각형의 연회색 평판을 연녹색 바다에 설치하고 실제 입수장면의 촬영과 같은 조건으로 촬영하였다. 그 결과가 아래 Fig. 6의 좌측상단 사진이다. 이와 같이 배경색과의 대비에 의한 빛 산란 효과에 의해 실제 크기인 30 cm(약 1.5 픽셀)보다 상당히 큰 크기로 촬영되어 별도의 픽셀 식별 과정을 수행하였다.

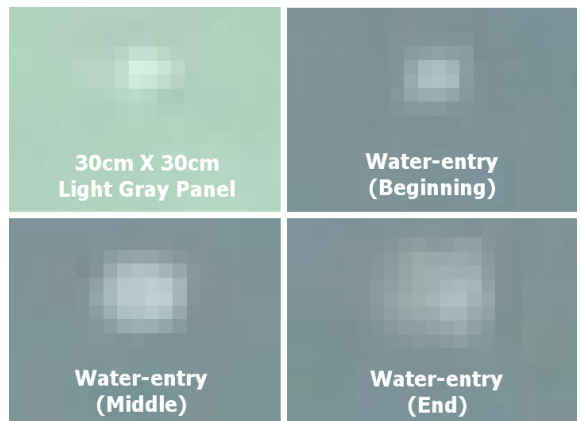


Fig. 6. Traces of water-entry(  $V_0 = 44$  m/s)

Fig. 6의 우측상단의 사진이 입수 초기의 흔적, 좌측하단이 입수 중기, 우측하단이 입수 말기의 사진이다. 영상에서의 픽셀 식별 방법은 다음과 같다.

픽셀의 식별을 위한 영상처리는 MATLAB을 이용하였다. 먼저 영상을 MATLAB의 “rgb2gray” 함수를 이용해 회색조 영상으로 변환하였다. 그 후 “imadjust” 함수를 이용해 영상의 명암을 조정하여 명암 대비를 극대화하였다.(Fig. 7을 Fig. 8로 조정) 명암이 조정된 영상은 “roicolor” 함수를 이용하여 흑백영상으로 변환하였다. 이때 흑백 이진화의 기준(threshold)은 회색조

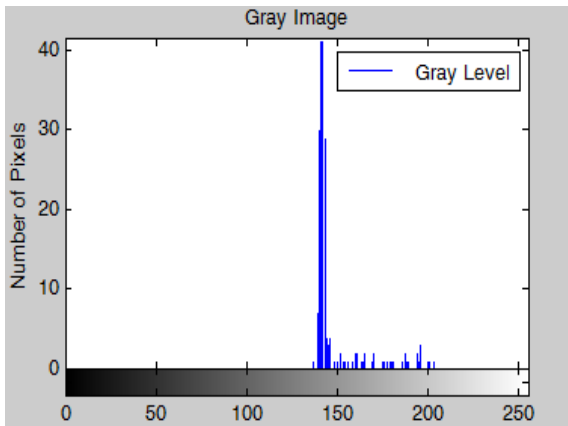


Fig. 7. Gray level(Gray-scale image)

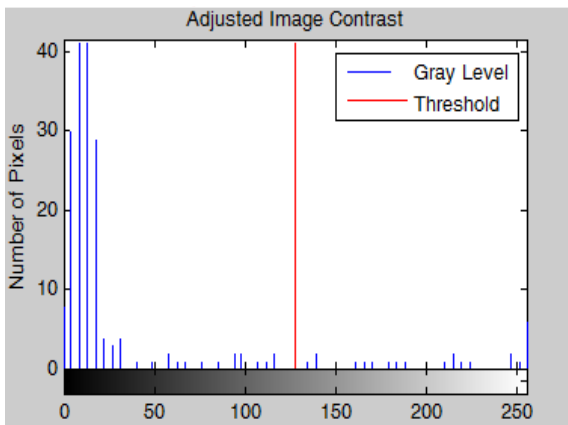


Fig. 8. Gray level(Adjusted image)



Fig. 9. Image processing

수치의 중간 값인 127.5를 사용하여 회색조 수치가 127.5 미만은 검정색(0)으로, 127.5 이상은 흰색(255)로 변환하였다. 이와 같은 일련의 과정은 다음의 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 입수 중기의 흔적의 픽셀 식별 과정이다. Fig. 9에서 식별된 픽셀의 개수와 픽셀 당 길이를 이용하여 식별된 픽셀의 실제 넓이를 계산하고, 입수흔적을 원으로 가정하여 넓이를 원의 직경으로 환산하였다.

입수 초기의 사진은 물의 튀에 의한 흔적으로, 교량 낙하시험과 같이 가장 선명한 흔적이 촬영되었다. 영상의 픽셀을 분석한 결과, 물의 튀에 의한 흔적의 직경은 약 0.782 m로 예측치인 0.639 m과 유사한 결과이다. 입수 중기의 사진은 기포 퍼짐에 의한 흔적 중 원형을 유지한 최대의 직경을 가진 상태이다. 그 직경은 약 1.082 m로 식별되었다. 기포 퍼짐에 의한 흔적이 파도에 의해 쓸려가면서 그 흔적이 사라지기 직전의 상태가 입수 말기의 사진이다. 영상에서 입수 말기의 직경은 약 1.335 m로 식별되었다. 따라서 기포 퍼짐에 의한 입수흔적의 직경은 약 1.082 m~1.335 m라고 할 수 있다. 기포 퍼짐 직경의 예측치인 1.236 m는 이 사이에 존재하므로 예측치는 타당하다고 판단된다.

#### 4.2 종단속도 이상의 속도로 입수하는 낙하물

4.1절에서 사용했던 Full-HD급 해상도의 캠코더를 장착한 무인헬기를 이용하여 별도의 낙하장치를 통해 투하되어 종단속도보다 빠른 속도(63 m/s)로 입수하는 소형 낙하물의 입수흔적을 촬영한다. 본 시험에서 캠코더는 500 m의 고도에서 직하방향으로 세로(1,080 픽셀) 약 338 m 해상영역(1픽셀 당 0.31 m)을 촬영하도록 zoom을 조정하였다. 영상에서의 픽셀 식별은 4.1절과 동일한 방법을 사용하였다.

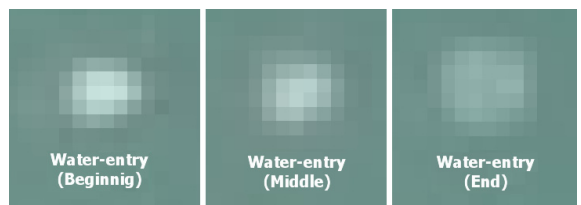


Fig. 10. Traces of water-entry ( $V_0 = 63$  m/s)

Fig. 10의 좌측의 사진이 입수 초기의 흔적이고, 중앙이 입수 중기, 우측이 입수 말기의 사진이다. 입수 초기의 사진은 물의 튀에 의한 흔적으로, 앞의 시험들

과 같이 가장 선명한 흔적이 촬영되었다. 그 직경은 약 1.261 m로 식별되었다. 이는 예측치인 1.310 m와 유사한 결과이다. 입수 중기의 사진은 기포 퍼짐에 의한 흔적 중 원형을 유지한 최대의 직경을 가진 상태이다. 그 직경은 약 1.442 m로 식별되었다. 기포 퍼짐에 의한 흔적이 파도에 의해 쓸려가면서 그 흔적이 사라지기 직전의 상태가 입수 말기의 사진이다. 영상에서 입수 말기의 직경은 약 1.851 m로 식별되었다. 따라서 기포 퍼짐에 의한 입수흔적의 직경은 약 1.442 m~1.851 m라고 할 수 있다. 기포 퍼짐 직경의 예측치인 1.394 m는 실제 측정치의 범위를 다소 벗어나나 최소치에 근접하므로 타당하다고 판단된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 모의 입수시험을 통해 얻은 입수흔적 자료들과 충격력 이론, 공동 이론을 이용하여 실제 종단속도와 그 이상의 속도로 낙하하는 낙하물의 입수흔적을 예측하고, 그 결과를 무인헬기를 이용한 항공촬영을 통해 검증하였다. 물의 튜(Splash) 직경은 입수속도의 제곱( $V_0^2$ )에 비례하여 증가하고, 기포(Bubble) 퍼짐 직경은 입수속도의 1/3승( $V_0^{1/3}$ )에 비례하여 증가한다. 초기에 예측했던 입수흔적에 영향을 주는 변수 중에서 입수속도만이 영향을 주었고, 운동에너지는 영향을 주지 못했다. 그리고 기포 퍼짐에 의한 입수흔적에 영향을 주는 추가 변수로 물의 염도가 확인됐다. 이러한 예측 결과는 무인항공촬영을 통해 획득한 결과를 통해 검증하였다. 무인항공촬영의 결과는 충분한 시인성을 가져 200 m 이상의 촬영영역에 대해 무인항공촬영법을 이용하더라도 해상 소형 낙하물의 입수흔적 촬영이 가능함을 확인하였다.

Table 6. Traces of water-entry

	Speed (m/s)	Diameter (m)	
		Splash	Bubble
Prediction	44.0	0.639	1.236
Experiment		0.782	1.08~1.34
Prediction	63.0	1.310	1.394
Experiment		1.261	1.44~1.85

그리고 Table 6과 같이 입수흔적 크기의 예측결과와 무인항공촬영을 통해 획득한 시험결과는 입수흔적의 식별가능성을 판단하는데 충분한 유사성을 보였다.

### References

- [1] Th. Von Karman, "The Impact on Seaplane Floats during Landing," NACA TN 321, 1929.
- [2] H. Wagner, "Landing of Seaplanes," NACA TN 62, 1931.
- [3] W. J. C. Boef, "Launch and Impact of Free Fall Lifeboats. Part I. Impact Theory," Ocean Engineering, Vol. 19, No. 2, 1992.
- [4] M. Arai, "Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat," Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, 1995.
- [5] P. R. Payne, "The Vertical Impact of a Wedge on a Fluid," Ocean Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 421-436, 1981.
- [6] Jong-Boong Lee, "A Study on the Impact Pressure of a Falling Body upon a Free Surface Water," J. Korean Society of Industrial Application, Vol. 4, No. 3, pp. 295-304, 2001.
- [7] V. Duclaux, F. Caille, C. Duez, C. Ybert, L. Bocquet, C. Clanet, "Dynamics of Transient Cavities," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 591, pp. 1-19, 2007.
- [8] E. S. Winkel, S. L. Ceccio, D. R. Dowling, M. Perlin, "Bubble-size Distributions Produced by Wall Injection of Air into Flowing Freshwater, Saltwater and Surfactant Solutions," Experiments in Fluids, Vol. 37, pp. 802-810, 2004.
- [9] H. Yan, Y. Liu, J. Kominiarczuk, D. K. P. Yue, "Cavity Dynamics in Water Entry at Low Froude Numbers," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 641, pp. 441-461, 2009.