[Research Paper]

수리모형실험을 통한 급류지역 수로관 위험성 연구

최신웅 · 최아영* · 한동훈**†

국립소방연구원 소방위, *국립소방연구원 선임연구원, **국립소방연구원 공업연구원

Analysis of Risks Associated With Water Pipes in Rapid Flow Waterways Through Waterway Modeling Experiments

Sin-Woong Choi · A-Young Choi* · Dong-Hun Han**†

Fire Lieutenant, National Fire Research Institute Of Korea,

*Senior Researcher, National Fire Research Institute Of Korea,

**Senior Research Officer, National Fire Research Institute Of Korea

(Received September 15, 2021; Revised October 4, 2021; Accepted October 4, 2021)

요 약

본 연구는 급류지역 수로관 시설물에서 수난구조 활동 중 반복적으로 발생하는 소방공무원의 순직사고를 예방하기 위해 사고 현장을 조사·분석한 정보를 바탕으로 수리모형실험을 수행하였다. 실험 결과, 수로관에 가까워질수록 유속이 빨라졌으며, 최대 유속이 가장 큰 폭으로 상승한 경우에는 수로관 전면 최대 유속보다 수로관 후면 최대 유속이 약 3.99배 높았고, 수로관 단면적 정면에서는 수로관 위쪽보다 아래쪽 유속이 더 빠른 경향을 보였다. 각 부위별 최대 유속은 수로관 입구를 기준으로 통과 전(10 cm)은 1.65 m/s, 통과 전(5 cm)은 2.63 m/s, 수로관 통과 시에는 7.12 m/s, 수로관 통과 후(5 cm)는 5.33 m/s로 측정되었다. 평균 유속은 통과 전(10 cm) 0.94 m/s, 통과 전(5 cm) 1.75 m/s, 수로관 내부는 5.53 m/s, 수로관 통과 후(5 cm)는 4.64 m/s로 측정되었다. 연구 결과를 바탕으로 관련 SOP, 지침 등을 고찰하고, 현장 대원의 수난구조 활동과 안전사고를 예방하기 위한 권고 및 지침 보완사항(안)을 제시하였다.

ABSTRACT

In this study, waterway modeling experiments were conducted by incorporating the information obtained by analyzing accident sites to prevent frequent accidents of firefighters that occur during water rescue operations conducted near water pipes in rapid flow waterways. Based on the conducted experiments, it was observed that the flow velocity increased with decreasing distance from the water pipe. Furthermore, the maximum flow velocity was found to be 3.99 times higher at the posterior end than at the anterior end of the water pipe, and the flow velocity was found to be higher at the lower side than at the upper side of the water pipe's anterior end. The maximum flow velocity was measured to be 1.65 m/s at a distance of 10 cm from the entrance to the pipe, 2.63 m/s at a distance of 5 cm from the entrance to the pipe, 7.12 m/s within the pipe, and 5.33 m/s at a distance of 5 cm from the pipe's exit. The average flow velocity was measured to be 0.94 m/s at a distance of 10 cm from the entrance to the pipe, 1.75 m/s within the pipe, and 4.64 m/s at a distance of 5 cm from the pipe's exit. Furthermore, in this study, relevant standard operating procedures and regulations were taken into consideration. Based on the results obtained from this study, recommendations and guidelines were then accordingly devised for preventing accidents of firefighters that occur during water rescue operations.

Keywords : Waterway modeling experiment, Waterway pipe, Flow velocity, Water rescue, Firefighters' safety

1. 서 론

소방관의 현장활동 중 특히, 여름철 국지성 폭우는 예측하기 어려운 자연재해로 물이 존재하는 계곡, 강 등 급류지역에서 수난구조 활동 중 사고가 종종 발생한다.

2011년 6월 25일 강원도 영월군의 계곡에서 불어난 급류에 휩쓸린 구조대상자를 구조하기 위해 투입된 구조대원은 수중 구조활동 중 수로관(흡관)으로 빨려들어가 순직하였고, 지난 2020년 7월 31일 전남 구례군에서는 폭우로 계곡물이 불어나 피서객이 물놀이 중 수로관에 끼인 사고가 발

† Corresponding Author, TEL: +82-41-559-0550, FAX: +82-41-541-1108, E-Mail: hdonghl@korea.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

생하여 구조대원이 투입된 후 수로관으로 빨려 들어가 순직한 사고가 발생하였다. 2020년에 발생한 사고현장을 직접 조사하고, 3D 스캐너를 활용하여 지형지물 및 환경에 필요한 물리적인 수치를 측정하였다. 수리모형실험은 수로관 환경과 수심을 각각 달리하여 총 9가지 조건으로 수로관 주변(입구 및 유출부)의 유속을 계측하였고, 수로관 내부의 유속과 상황 관찰을 위해 염료(dye)와 구조대원 모형(diver miniature)을 활용하여 유속을 계측·분석하였다. 또한, 실험의 일부 조건에서는 particle image velocimeter (PIV)를 활용하여 유속장을 시각화하였다.

본 연구에서는 급류지역의 수로관 주변 및 내부의 위험성을 수리모형실험을 통해 예측하여 수로관에서 반복적으로 발생하는 소방대원의 순직사고를 예방하고자 한다.

2. 본 론

2.1 사고 현장 조사

수리모형실험의 정확한 설계를 위해 현장조사를 통해 Figure 1(a)와 같이 교량, 수로관 및 주변 환경의 물리적 수치를 측정하였다(1차 현장조사 시 실측, 2차 현장조사 시 교량 제거 상태).

교량의 높이는 2.1 m, 폭은 3.0 m, 교량의 길이와 강폭은 약 30.0 m이며, 수로관의 지름과 상단까지 높이는 각각 1.0 m, 길이는 4.0 m로 측정되었다. 교량과 수로관 주변을 단순화하여 상공에서 바라본 모습은 Figure 1(b)와 같이 도시화할 수 있으며, 사고 발생 지점의 수로관은 Pipe B이다. 수로관 A, B, C 각각 길이는 4 m이나, 교량을 벗어나 양 끝 부분에 도출되어 있는 부분이 각각 0.5 m이다. 수로관 A와 교량 끝부분 간격은 약 7.5 m, 수로관 A와 B의 간격은 2.1 m, 수로관 B와 C 간격은 6.4 m, 수로관 C와 교량 끝부분 간격은 약 11 m로 측정되었다.

2.2 수리학적 상사법칙에 의한 모형 축척

원형(prototype)의 수리현상을 모형(model)에서 재현하기 위해서는 두 흐름 사이에 수리학적 상사성(similitude)을 근거로 실행되어야 유의미하다⁽¹⁾. 이를 위하여 필요한 세 가지 조건은 다음과 같다⁽²⁾. 1) 기하학적(geometric) 상사로, 모형은 원형과 같은 형상이어야 하고, 축척비만큼 비례한다는 의미이다. 2) 운동학적(kinematic) 상사로 모형 유동 내의 어떤 한 위치의 속도는 원형 유동 내의 대응점의 속도와 비례하고 방향이 같아야 한다. 3) 가장 제한적인 역학적(dynamic) 상사로 모형 유동에 나타나는 모든 힘이 원형 유동에서 대응하는 힘과 비례하여야 한다. 운동학적 상사는 역학적 상사가 성립하기 위한 필요조건이지만 충분조건은 아니므로, 모형과 원형 유동에서 역학적 상사는 성립하지 않을 수 있다⁽³⁾.

수리학에서 파랑의 전파와 변형을 지배하는 힘은 중력, 점성력, 표면장력 등이며, 이 중 중력은 froude 상사^(2,3)를

Figure 1. (a) Photos, and (b) Measurements of incident site near the bridge.

통해 모형에서 재현된다. 자유표면을 갖는 흐름은 중력의 영향이 지배적이며 모형 축척은 froude 상사법칙에 따라 결정된다. 해안에서의 흐름에 지배적인 힘은 중력과 관성력 이므로, 본 실험에서는 원형과 모형의 froude 수를 같게 하는 froude 상사법칙을 적용하여 실험을 수행하였다. 유체의 다른 특성(압력, 점성력, 표면장력)들에 의한 영향은 무시하며, 흐름을 주로 지배하는 힘은 중력이므로 관성력과 중력의 비가 각각 원형과 모형에서 동일하면 두 흐름은 수리학적 상사를 이룬다고 볼 수 있다.

$$\frac{U_p}{\sqrt{g_p L_p}} = \frac{U_m}{\sqrt{g_m L_m}} \quad (1)$$

상기 (1) 좌항에서 U_p 는 원형의 속도, g_p 는 원형의 중력가속도, L_p 는 원형의 길이를 의미하며, 우항에서 U_m 은 모형의 속도, g_m 은 모형의 중력가속도, L_m 은 모형의 길이를 의미한다. 따라서, 좌우 항은 각각 원형(p)과 모형(m)에서의 froude 수(Fr)임을 알 수 있고, 이것은 중력이 흐름을 지배하는 수리학적 상사 조건이며, froude 상사법칙에 의한 축척비는 Table 1과 같다⁽⁴⁾.

본 실험의 대상인 2020년 전남 구례군 사고 현장에서의 유체 흐름의 특성은 관성력과 중력이 지배력이 되며, 이 때 상사법칙은 froude 상사법칙을 적용할 수 있다. 원형 흐름 지배력의 영향을 모형에서 그대로 적용시키는 것이 효율적

Table 1. Scale Ratio of Froude's Similitude Law

Variable	Equation	Normal scale
Velocity	$U_r = \text{length} / \text{time}$	$U_r = L_r^{1/2}$
Time	$t_r = \text{length} / \text{velocity}$	$t_r = \frac{L_r}{U_r} = L_r^{1/2}$
Acceleration	$a_r = \text{velocity} / \text{time}$	$a_r = \frac{U_r}{t_r} = \frac{L_r^{1/2}}{L_r^{1/2}} = 1$
Flow rate	$Q_r = \text{velocity} \times \text{square}$	$Q_r = U_r = L_r^{5/2}$

Table 2. Scale Ratio of Model Used

Variable	Symbol	Scale formula	Scale ratio
Length	L_r	L_r	1/10
Square	A_r	L_r^2	1/100
Time	t_r	$L_r^{1/2}$	1/3.16
Velocity	V_r	$L_r^{1/2}$	1/3.16
Acceleration	a_r	1	1

이지만, 원형에서는 중력의 지배를 받는 흐름상태가 모형의 축척이 과다한 경우 수심이 너무 작아져서 점성력의 지배를 무시할 수 없게 되는 경우도 있다⁽⁵⁾. 이러한 축척효과(scale effect)를 배제하기 위해서는 축척을 결정할 때 원형과 모형에서의 흐름상태가 같은 지배력의 상관관계 하에 있도록 모형에서 일정 치수를 보장해 줄 필요가 있다. 따라서, 본 실험대상의 수리모형실험을 위해서 모형 적용 축척 환산치에 의해 1/10 축척의 정상모형을 적용하고, 길이 축척은 1/10, 유속은 1/3.16로 환산되며, 모형의 적용 축척 환산치는 Table 2와 같다^(2,3).

2.3 실험설비 및 측정장비

수리모형실험을 위해 사용한 고정식 개수로의 측면도와 고정식 실험시설은 Figure 2와 같다. 수로의 총 길이는 30.0 m, 폭은 1.5 m, 높이는 1.0 m이다. 각 장치의 명칭인 A는 고수조, B는 고정식 개수로, C는 저수조, D는 밸브, E는 정류장치, F와 J는 수위계, G와 I는 유속계, H는 수로관 모형, K는 수위조절장치, L는 펌프이다. 고수조로부터 고정식 개수로로 물을 유입시키기 위한 관로가 설치되어 있으며, 상류부 흐름을 안정시키기 위한 정류장치(rectifier)가 설치되어 있다. 하류부에는 수위를 조절하기 위한 위어(weir)가 설치되어 상하류부 수위를 조절할 수 있다. 실험에 사용한 물은 저수조로 집수되고, 펌프로 고수조로 끌어올리는 순환시스템이 적용되어 있다.

실험에 필요한 측정장비는 3차원 전자기식 유속계를 사용하여 X, Y, Z축 방향의 유속을 측정하였고, 유체 흐름의 가시화를 위하여 염료를 사용하였으며, PIV 시스템을 활용하여 대표적인 조건에 대하여 PIV 실험을 수행했다. 초고

Figure 2. (a) Components of fixed waterway experiment facilities, A: high water tank, B: fixed waterway, C: low water tank, D: valve, E: rectifier, F and J: water level meter, G and I: flow meter, H: waterway pipe, K: water level control device, L: pump, (b) Photo of waterway experiment facilities.

Figure 3. (a) Simplified incident site, (b) Downscaled waterway model.

속 카메라와 드론을 활용하여 수로관 및 주변의 흐름과 실험 과정 등을 촬영하는데 활용하였다.

2.4 모형 제작 및 실험 조건

본 실험은 2020년 전남 구례군 사고현장(Figure 3(a))과 유사한 조건으로 구성하여 단면의 축척(1/10) 및 상사법칙을 고려하고, 모형을 단순화하여 Figure 3(b)과 같이 제작하였다. 고정식 개수로 폭이 1.5 m인 관계로 원형의 수로관 3개를 모두 설치하면 수로관과 주변 유동의 간섭이 예상되어 정확한 유속 측정이 불가하여 수로관은 2개만 대칭하여

Table 3. Cases of Waterway Experiment

Diameter \ Depth	20 cm	15 cm	10 cm
Upstream 25 cm, Downstream 15 cm	Case 1-1	Case 2-1	Case 3-1
Upstream 30 cm, Downstream 20 cm	Case 1-2	Case 2-2	Case 3-2
Upstream 35 cm, Downstream 25 cm	Case 1-3	Case 2-3	Case 3-3

Figure 4. Locations of flow velocity measurement (a) at lateral view, and (b) at front view of the water pipe.

설치하였다. 실험모형은 고정식 개수로 내부에 설치하여 물 흐름에 의한 모형의 움직임을 방지하고자 수로 측 벽에 실리콘으로 고정시켰다.

수리모형실험의 조건(총 9가지)은 Table 3과 같이 수로 관 관경을 3가지로 설정하였다. 상류 수심은 교량을 월류(over flow)하지 않는 조건(25 cm, case 1), 교량의 천단(ceiling)과 같은 조건(30 cm, case 2), 교량을 월류하는 조건(35 cm, case 3)로 설정하고, 하류 수심은 상류보다 10 cm씩 낮게 설정하였다.

유속 계측은 상류와 하류의 수심이 정상상태에 도달한 후 계측했고, Figure 4 측면도의 section 1, 2, 3에서 유속을 계측하였다. 각 section에서 정면도의 42개 빨간 심볼 위치에서 유속을 계측하였고 Figure 4(b)와 같다.

2.5 조건별 유속 계측

실험은 2개의 수로관이 개수로의 중심으로부터 대칭하게 위치하였으며, 중심으로부터 우측 1개만 유속을 계측하였고, 그 결과는 Table 4와 같다.

Figure 5는 9가지의 실험 결과 중 section 1에서 section 2로 가까워질수록 최대 유속이 가장 큰 폭으로 상승한 대표적인 case 3-1의 section 1, 2, 3의 유속 계측 결과를 도시화하였다.

Table 4. Maximum, and Average Velocity at Section 1, 2 and 3

Case	Section cm/s (prototype: m/s)			Section 2/ Section 1	Section 3/ Section 2
	1	2	3		
1-1	29.30 (0.93)	44.74 (1.42)	160.54 (5.08)	1.53	3.59
1-2	40.88 (1.3)	53.03 (1.68)	162.45 (5.14)	1.30	3.06
1-3	52.12 (1.65)	68.19 (2.16)	143.56 (4.54)	1.31	2.11
2-1	25.42 (0.8)	48.43 (1.53)	146.94 (4.65)	1.91	3.03
2-2	22.86 (0.72)	44.01 (1.4)	124.13 (3.93)	1.93	2.82
2-3	37.47 (1.19)	74.85 (2.37)	135.21 (4.28)	2.00	1.81
3-1	21.24 (0.67)	83.12 (2.63)	168.67 (5.33)	3.91	2.03
3-2	16.50 (0.52)	39.19 (1.24)	156.19 (4.94)	2.38	3.99
3-3	21.41 (0.68)	43.34 (1.37)	123.68 (3.91)	2.02	2.85
Average	(0.94)	(1.74)	(4.64)	2.032	2.810

Figure 5. Flow velocity distributions (case 3-1) of (a) Section 1 (b) Section 2 (c) Section 3.

Figure 6. Flow velocity distributions (case 1-3) measured points at front view of the pipe.

Table 5. Flow Velocity of Case 1-3(12 points) at Front View of the Pipe

Vertical \ Width	Points (m/s)		
	3	4	5
a	0.8	0.89	0.99
b	0.89	1.57	1.53
c	0.96	1.9	1.81
d	0.75	1.85	2.18
e	0.82	1.89	2.18

그 결과, 최대유속은 section 1 약 21.24 cm/s, section 2 약 83.12 cm/s, section 3 약 168.67 cm/s로 각각 측정되었다. 수로관 모형으로부터 section 1은 10 cm (원형: 100 cm), section 2와 3은 5 cm (원형: 50 cm) 떨어진 곳에 위치하고, 수로관 모형 전면에 가까운 section 2의 최대유속은 section 1에 비하여 최대 3.91배 빨랐으며, 최대 유속은 약 83.12 cm/s (원형에서는 약 2.6 m/s로 환산)로 매우 빠르기 때문에 수로관 입구와 가까워질수록 매우 위험할 것으로 판단된다. 또한, 수로관 모형 후면에 위치한 section 3의 최대 유속은 section 2에 비하여 약 1.8~4.0배 빠른 것으로 확인되었고, 최대 유속은 약 168.67 cm/s (원형에서는 약 5.33 m/s로 환산)로 수로관 후면에서의 유속이 상당히 빠른 것으로 판단된다.

Figure 6은 case 1-3의 수로관 입구측과 주변 35개 포인트의 유속 측정 분포도로 수로관이 있는 빨간 심볼 15개 포인트를 중심으로 경향을 분석하였다.

Table 5는 case 1-3의 수로관 입구측 15개 포인트의 시간대별 유속 측정 결과의 평균값을 원형의 유속으로 환산한 결과이며, 수로관의 위쪽보다 아래쪽 유속이 더 빠른 경향으로 분석되었다.

수로관의 내부로 통과하는 유속을 측정하기 위해 붉은 염료를 활용하여 관찰하고 유속을 분석하였다. Figure 7(a)은 붉은 염료를 개수로 상류부에서 흘려 수로관으로 유입되는 흐름을 가시화한 모습으로 상공에서 드론으로 촬영하였고, 염료의 수로관 통과 직후 모습을 볼 수 있다.

Figure 7(b)은 수로관을 통과하는 붉은 염료의 흐름을 초고속카메라로 초당 60장을 측면에서 촬영하여 유속을 계산하였다.

Table 6은 붉은 염료의 수로관 통과 유속 측정 결과를 환

(a)

(b)

Figure 7. (a) Velocity visualization using dye with a drone (b) Flow velocity measurement with dye using a high speed camera.

Table 6. Flow Velocity at Section 2 and through the Pipe with Diver Miniature

Case	Maximum velocity at Section 2 (m/s)		Pipe passing velocity (m/s)		Pipe passing velocity / Maximum velocity at Section 2
	model	prototype	model	prototype	
1-1	0.45	1.4	1.63	5.16	3.64
1-2	0.53	1.68	1.80	5.69	3.39
1-3	0.68	2.16	2.25	7.12	3.30
2-1	0.48	1.53	1.50	4.74	3.10
2-2	0.44	1.39	1.80	5.69	4.09
2-3	0.75	2.37	2.25	7.12	3.01
3-1	0.83	2.63	1.50	4.74	1.80
3-2	0.39	1.24	1.50	4.74	3.83
3-3	0.43	1.37	1.50	4.74	3.46
Average	-	1.75	-	5.53	3.29

산하여 표로 나타내었다. Case 3-1의 수로관을 통과하는 유속은 수로관 전면 section 2의 최대 유속에 비해 약 1.8배, Case 2-2에서는 약 4.09배로, 최소 1.8배에서 최대 4.09배까지 빠른 것을 알 수 있었다.

아울러, 구조대원이 수중 활동 시 수로관 흡입구에서 내부로 빨려 들어가는 상황을 관찰하기 위해 모형(miniature)을 활용하여 초고속카메라로 촬영하였다. 수로관에 구조대상자 모형(victim miniature)이 없는 경우(Figure 8(a))에는 구조대원 모형(diver miniature)이 수로관 입구로 가까이 접근할수록 속도는 서서히 빨라지다가 내부로 빠르게 빨려 들어가는 것을 관찰하였고, 통과 시간은 평균 약 4 s가 소요되었다. 수로관 입구에 구조대상자 모형이 있는 경우

Figure 8. Flow velocity measurement with diver miniature using a high speed camera.

Figure 9. Flow field measurements by PIV.

(Figure 8(b))에는 수로관 입구로 가까이 접근할수록 속도는 서서히 빨라지다가 입구에서 구조대상자 모형에 걸려 지체되었지만, 이내 빠르게 빨려 들어가는 것을 관찰하였으며 통과 시간은 평균 약 7 s가 소요되었다.

Figure 9는 case 1-3에 대하여 대표적으로 PIV 실험을 수행한 결과이다. 초고속카메라로 초당 15장의 사진을 촬영하여 유속장을 가시화하였다. 수로관 전면부에서 수로관으로 유체가 빨려 들어가는 것을 확인할 수 있었으며, 수로관을 제외한 부분은 차폐되어 와류가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

2.6 유속 계측 결과 정리

유속 계측 결과를 종합하여 정리하면, 수로관 흡입구로 가까워질수록 유속이 빨라졌으며, 최대 유속이 가장 큰 폭으로 상승한 조건에서는 수로관 전면 최대 유속보다 수로관 후면 최대 유속이 약 4배가 높은 것으로 나타났다. 또한, 수로관 단면적의 정면을 기준으로 측정하여 분석한 결과, 수로관의 위쪽보다 아래쪽 유속이 더 빠른 경향으로 측정되었다(Figure 10(a)).

Figure 10. Average flow velocities according to the locations at (a) front view, and (b) lateral view of the pipe.

Table 4에서 언급한 바와 같이 유속을 정리하면 다음과 같다. 모든 실험조건에서 수로관 입구를 기준으로 최대 유속은 통과 전(10 cm) 1.65 m/s, 통과 전(5 cm) 2.63 m/s로 각각 측정되었으며, 수로관 통과는 7.12 m/s, 수로관 통과 후(5 cm)는 5.33 m/s로 각각 측정되었다.

Figure 10(b)는 각 section 별 평균 유속으로는 통과 전(10 cm) 0.94 m/s, 통과 전(5 cm) 1.75 m/s, 수로관 내부 5.53 m/s, 수로관 통과 후(5 cm)는 4.64 m/s로 각각 측정되었다.

3. 고 찰

3.1 급류구조 현장 대응 고찰

본 실험과 관련하여 “급류구조 대응 실무”⁽⁶⁾ 및 “수난구조 현장활동 지침”⁽⁷⁾을 검토하고, 현직 구조대원 5명의 자문 의견을 반영한 급류구조 현장 대응 방안의 고찰 내용은 다음과 같다.

1) 급류지역 내 수로관 흡입구에 걸려 고립된 구조대상자의 구조활동을 대비한 사전 위험평가와 훈련이 필요하다. 위험평가 검토사항으로는 수로관의 흡입구와 유출구의 지름, 길이, 형태, 구조물 등과 주변 지형지물을 완벽하게 이해하고, 사전에 현지 적응 훈련 등을 통해 위험 요소를 숙지하여야 할 것이다.

구조대상자를 수로관 흡입구에서 구출하여 흡입구 방향의 수면으로 안전하게 구조하는 것은 이론적으로 불가능하므로, 흡입구 주변 유속을 저하시킬수 있는 방법을 강구하여야 한다. 또한, 구조대상자가 수로관 흡입구(상류)에서 고립이 해제되면 곧바로 유출구(하류)로 빠져나오므로 구조대상자의 유실을 방지하기 위해서는 하류 방향에서 거리별로 구조팀(2개 팀 이상)이 대기하여야 한다. 따라서, 급류환경에서의 수중 구조활동은 매우 위험하므로, 유속이 완전히 느려진 후에 수행하는 것을 권고한다.

2) 구조대원은 급류환경의 수중구조 활동 시 장비 운용 문제점의 발생 가능성을 인지하여야 한다. 급류 수중 환경에서는 공기통(SCUBA tank), 중량 벨트(weight belt), 자기확보 로프 등의 신속한 해제(quick release)가 곤란하다. 또한, 정상적인 수중환경에 비해 빠른 유속으로 더 많은 공기가 소모되며, 호흡기 2단계(the second stage of regulator)에서 공기

가 계속 누출되는 프리플로우(free flow) 현상의 발생 등 긴급상황에 따른 대처가 곤란하여 수경(mask)과 호흡기의 이탈 등 필수장비의 기능 유지가 불가능한 상황이 발생한다.

3) 현장지휘관은 급류현장의 유속을 확인하여 잠수활동 가능 여부를 판단하되, 0.51 m/s (≒ 1 Knot) 유속을 기준으로 일정 조건이 충족되는지 사전 검토가 필요하다.

“수난구조 현장활동 지침”⁽⁷⁾에 의하면, 수중 환경 평가 시 일반잠수가 가능한 유속은 0.51 m/s 이하이고, 0.51~0.77 m/s (≒ 1.5 Knot) 사이는 현장지휘관의 판단으로 결정, 0.77 m/s 초과 유속은 모든 잠수의 금지를 적시하고 있다. 따라서, 급류현장 유속이 0.51~0.77 m/s 사이의 현장지휘관의 판단은 1) 빠른 유속의 저항을 줄이기 위한 장비 장착 여부, 2) 호흡 필수장비의 기능 유지를 위해 호흡기가 내장된 전면형 마스크(full face mask)의 사용, 3) 비상 상황에서 잠수대원 스스로 신속하게 해제 가능한 확보 장비의 준비, 4) 급류 구조 전문과정 수준의 교육 이수 여부 등의 기준으로 판단할 수 있으며, 급류 상황의 완벽한 이해 등 조건들이 완전히 충족되어야 제한적으로 급류 수중 구조활동이 가능할 것이다.

잠수 금지 기준 유속에 해당하는 0.77 m/s를 본 실험결과와 비교하면, 수로관 통과 직전 최대유속은 잠수 금지 기준 유속보다 약 3.4배, 수로관 통과 직전의 평균유속은 잠수 금지 기준 유속의 약 2.2배이므로 실험결과와 유속에서는 안전을 고려하여 모든 잠수를 금지하여야 할 것이다.

3.2 급류구조 관련 지침 등 보완사항 고찰

본 연구의 배경이 되는 사고의 주요 시사점은 1) 급류구조 현장에서 한계를 벗어난 구조활동의 기준 정립, 2) 구조활동 전 수심, 유속 등 사전 현장안전 평가, 3) 구조활동이 어려운 경우 구조 방법의 변경과 중지 등으로 판단된다. 이에, 연구 결과를 안전정책에 반영하기 위하여 “SOP (재난현장 표준작전절차) 313 수난사고 대응절차”⁽⁸⁾와 “수난구조 활동 지침”⁽⁷⁾을 검토 후 보완사항을 다음과 같이 고찰하였다.

1) “SOP 313”은 수난 공통, 수상 사고, 수중 사고 3가지로 분류하여 각 사고 특성별 전문성과 안전성을 고려하여 수심, 유속 등 주변 환경에 대한 사전 안전 평가를 실시 후 위험 예측 등을 통해 구조활동이 전개되도록 적시되어야 한다. 현재 “SOP 313”에는 수난구조의 사고특성 및 주의사항, 수상, 수중구조 방법에 대해 공통적으로 간략하게 설명만 되어 있을 뿐, 위험 유속과 관련한 핵심 내용인 수난구조 활동 시 유속 단계별 투입여부 등은 표현되지 않아 추가 보완·보완이 필요하다. 따라서, 본 연구 결과의 핵심 내용을 구조활동 위험평가, 급류 및 조류 잠수 시 유의사항, 급류지역 수로관 존재 시 유의사항 등을 추가·보완하여야 할 것이다.

2) “수난구조 현장활동 지침”에 수난구조 활동 중지 및 종료 기준을 명확히 제시할 필요가 있다. 수난사고의 유형, 발생 장소, 기상 조건 등 현장 환경이 각각 다르므로 구조활동 중지 시기를 일률적으로 정하기 매우 어려우나, 구조

대원의 한계를 벗어난 환경, 집중력 저하, 피로도 가중으로 안전사고 발생과 출동 공백을 고려해야 한다. 따라서, 추측성 신고 등으로 사고에 대한 객관적 사실 확인이 어렵고, 사고의 위치가 불분명한 경우와 기상악화, 급류, 지반침하, 장애물 등으로 구조활동을 수행 중인 대원의 생명 및 안전에 중대한 위험을 초래할 우려가 있다고 판단되는 경우 현장지휘관은 상황판단 회의 등을 통해 신중히 활동 중지 시기를 결정할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 급류지역 수로관 시설물에서 수난구조 활동 중 반복적으로 발생하는 소방공무원의 순직사고를 예방하기 위해 사고 현장을 실측하고, 축소모형을 제작하여 9가지 조건으로 유속을 측정하고 위험성을 분석하였다. 그 결과, 수로관 입구 위쪽보다 아래쪽의 유속이 빠른 경향이 나타나 위험하다는 것을 확인하였고, 수로관 입구에서 내부로 들어갈수록 유속이 빠르게 측정되었다.

수로관 부위별 평균 유속 측정 결과, 수로관 통과 전 10 cm 이격된 지점은 0.94 m/s, 5 cm 이격된 지점은 1.75 m/s로 10 cm 지점에 비해 2배 가까이 증가하여, 수로관 입구에 가까워질수록 유속이 높아지는 것을 확인하였다. 수로관 내부는 5.53 m/s, 수로관을 통과해 5 cm 이격된 지점은 4.64 m/s로 수로관 중심부에서 가장 유속이 높은 것으로 나타났다.

따라서, 현장지휘관과 구조대원은 급류지역 내 수로관이 존재할 때 다음 사항을 유의하여 현장활동에 임해야 할 것이다.

1) 계곡, 하천 등 수면에서 보이는 유속보다 수로관 흡입구 주변 유속은 약 4배가 빠르고, 수로관 가까이 접근할수록 위험하다.

2) 집중호우 시 수면에서의 유속이 빨라 보이지 않더라도 수로관 주변의 유속은 매우 빠르므로, 가까이 접근하는 것을 신중히 고려한다.

3) 수로관의 유속이 급격하게 빨라지는 지점을 파악하고 그 지점의 유속을 저하시킬 수 있는 방법을 고려하며, 유속이 완전히 느려진 후에 구조활동에 임하기를 권고한다.

본 연구는 수난구조 현장의 안전정책 기초자료로 활용될 것이며, 급류지역 수로관의 위험성 인지로 유사한 현장의 수심, 유속 등 주변 환경에 대한 위험 예측 등을 통해 현장 대응과 안전사고를 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 국립소방연구원의 “현장 소방활동의 과학적 안전관리체계 및 기법 연구”로 수행한 결과(유투브 <https://vvd.bz/i4l>)이며, 수난구조 및 재난현장에서 순직하신 소방공무원들의 숭고한 희생과 노고에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. R. Ettema, R. Arndt, P. Roberts and T. Wahl, "Hydraulic Modeling: Concepts and Practice", ASCE (2010).
2. R. W. Fox, A. T. McDonald, P. J. Pritchard and J. W. Mitchell, "Fluid Mechanics 9th Edition", John Wiley, & Sons Ltd., Chichester, New York, pp. 275-288 (2016).
3. Y. A. Çengel, J. M. Cimbala and R. H. Turner, "Fundamentals of Fluid Mechanics SI UNITS (Core Version)", McGraw-Hill Ltd., USA, pp. 193-201 (2018).
4. L. I. Sedov, "Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. Academic Publishers, Norwel", Massachusetts (1959).
5. USBR., "Hydraulic Laboratory Techniques", U.S. Bureau of Reclamation (1980).
6. National Fire Agency, "Swiftwater Rescue Manual Version 1", pp. 13-74, 184-205 (2018).
7. National Fire Agency, "Water Recue Field Guide, pp. 22-40, 56-61 (2020).
8. National Fire Agency, "SOP's (Standard Operation Procedures)", pp. 106-107, 179 (2018).