J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 54, No. 1 (2021), pp. 15-25
doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.1.15
pISSN 1226-6280
eISSN 2287-6138

An analysis on effectiveness of circular culvert fishway

Kim, Ki Heung[a]*

[a]Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju, Korea

Paper number: 20-089
Received: 15 September 2020; Revised: 16 October 2020; Accepted: 16 October 2020

Abstract

The purpose of this study was to present the necessity and effect of culvert fishway, based on the absence of design criteria for it which fishes can pass. As an attempt for this purpose, circular culvert fishway were designed hydraulically to meet the passage condition for selected target fish species, and post-monitoring was performed to confirm its effectiveness. In the case of general circular culvert without weir baffles, the target fish species cannot pass because of the constant depth and velocity in the entire reach of the circular culvert, so it was confirmed that resting pools must be installed to help fish passage. In the case of circular culvert with weir baffles, the depth and the mean velocity in resting pool increased by about 240% and decreased by about 70% respectively, which not only satisfied the passage conditions of *Zacco platypus* that can swim at more than 10 times the speed of body length for 1 to 5 seconds, but also confirmed that various river fish could pass. Post-monitoring results of the restoration reach and fish capture monitoring surveys of circular culvert fishway demonstrated that the target fish species, *Zacco platypus*, can pass through it.

Keywords: Target fish species, Resting pool, Weir baffles, Post-monitoring, Fish capture monitoring

원형암거 어도의 효과 분석

김기흥[a]*

[a]경남과학기술대학교 토목공학과 교수

요 지

본 연구는 어류소상을 위한 암거어도에 대한 설계기준이 미비함에 착안하여 그 필요성과 효과를 제시하고자 하였다. 이러한 목적을 위한 시도로서 선정된 목표어종에 맞추어 수리학적으로 원형암거 어도를 설계하였으며, 설치된 어도에 대한 효과를 확인하기 위한 모니터링을 시행하였다. 위어 배플을 설치하지 않은 일반적인 원형암거의 경우 암거 전체 구간에서 일정한 수심과 유속이 형성되기 때문에 대상어종이 소상할 수 없으므로 어류 소상을 돕기 위해서는 반드시 휴게풀이 있는 어도의 설치가 필요함을 확인하였다. 위어 배플이 설치된 원형암거 경우에 휴게풀에서 수심은 240% 증가하고 유속은 70%가 감소하므로써 1 ~ 5초간 체장의 10배 이상의 돌진속도로 유영할 수 있는 피라미의 소상조건을 만족시킬 뿐 아니라 다양한 하천성 어종의 소상이 가능함을 확인하였다. 복원구간에 대한 사후 모니터링과 원형암거 어도에 대한 어류 포획 모니터링 조사에서 목표어종인 피라미가 어도를 이용하여 소상함을 입증하였다.

핵심용어: 목표어종, 휴게풀, 위어-배플, 사후 모니터링, 어류포획 모니터링

1. 서 론

암거(culvert)는 용수나 배수용의 수로가 도로, 철도 및 제방 등의 제체 하부에 매설되는 구조물로서 일반적으로 제체의 한쪽에서 다른 쪽으로 물이 흐르며, 단면은 원형관 또는 박스 형태가 일반적이다. 암거는 크기, 경사, 유·출입부의 수심 등의 조건에 따라 유입부 또는 유출부의 조절을 받는 흐름을 형성한다. 이러한 암거는 대부분의 경우 수생동물의 상류 및 하류 이동을 가능하게 하지만(Pearson *et al*., 2006), 유량의 변화에 따른 수심 및 유속 등이 장애조건을 형성하면 암거를 통한

***Corresponding Author.** Tel: +82-55-751-3294
E-mail: khkim@gntech.ac.kr (K. H. Kim)

© 2021 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

수생동물의 이동을 제한할 수 있으며, 특히 어류에게는 상류 소상에 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 따라서, 가장 큰 관심사 중의 하나는 암거를 통한 어류의 상류 소상능력이다(Ken Bate, 2003). 도로 및 제방에 설치되는 암거가 수생동물 이동에 있어서 장애물이 된다는 것은 널리 알려진 사실이며, 특히 어류의 서식과 산란을 위한 상류 소상에 대해서는 여러 문제가 발생하고 있다(Warren and Pardew, 1998 ; Macpherson *et al*., 2012). 암거의 입구(상류)는 자연수로 폭에 비해 상당히 좁아지기 때문에 암거에서 흐름을 제한하여 평균유속을 증가시키는 문제가 있으며, 해당 하천에 서식하는 주연성 어류 및 회유성 어류의 유영능력을 초과하는 큰 유속은 적절한 시기에 상류 서식지로 소상하는 것을 차단할 수 있다(Duguay, 2014). 암거의 길이는 어류 소상에 악영향을 줄 수 있는 변수인 데, 연장이 과도하게 긴 암거, 특히 적절한 휴식 공간이 없는 암거는 상류로 이동하는 유영력이 약한 어종에 대해서 장기적인 운동을 요구하므로 암거의 출구 근처에서 소상을 완료하는 데 필요한 체력이 부족하여 흐름에 저항할 수 없을 때 하류로 떠내려간다(Macdonald and Davies, 2007). 또한 부적절한 수심은 상류 어류소상을 방해할 수 있으며(Duguay, 2014), 암거 출구(하류)의 세굴에 의한 높은 낙차나 큰 유속은 소상 어류의 입장에서 최초의 장애물로 인식되며, 최악의 경우 대부분의 어류는 소상을 포기한다.

미국의 유타주에는 47,000 개 이상의 암거가 있는 데 그 중 많은 곳이 수리나 교체가 필요하며(Beaver and McGrath, 2005), 최근에는 노후화된 파형강관 암거 내부를 고밀도 폴리에틸렌 재료 등으로 슬립 라이닝(slip lining)하는 방안도 제시되고 있다. 어류 소상과 관련된 공통적인 장애물은 암거 출구에서의 높은 단차, 암거내의 과대한 유속 및 또는 얕은 수심, 과도한 난류 및 암거 입구의 유사 등의 퇴적을 포함하고 있다(Pearson *et al*., 2006 ; Pringle, 2003). 암거의 경사는 일반적으로 0에서 약 5 %까지 다양하지만 암거가 어류소상을 방해하는 하는 경우에는 기존의 수리학적 설계절차를 수정해야 한다(Katopodis, 1977; Dane, 1983; Kane and Wellen, 1985).

최근에는 암거의 어류소상 능력을 향상시키기 위해 여러 형식의 배플 시스템이 제안되고 있는데, 캐나다 앨버타(Alberta) 대학에서는 암거 시스템을 수리학적으로 다양한 유량 및 다양한 유형의 어류에 맞게 설계하고 새로운 유형을 개발하기 위한 광범위한 프로젝트를 수행했다. 이 연구에서는 오프셋 배플(offset baffle), 슬롯형 위어 배플(slotted weir baffle) 및 위어 배플(weir baffle)을 표준으로 하고 이것들을 변형시킨 스포일러 배플(spoiler baffle), 알버타 피쉬위어(Albert fishweir)과 알버타 피쉬배플(Albert fishbaffle) 시스템을 갖춘 원형암거 어도에 중점을 두었다(Rajaratnam *et al*., 1988a; 1988b; 1989; 1990; Ead *et al*., 2002).

그러나, 국내에서는 암거 배수시설에 대한 기준인 도로설계기준과 도로 배수시설 설계 및 관리지침에 암거 설계시 어류소상을 위한 설계기준을 제시하지 않고 있어 수생동물 및 어류의 종적 연속성을 전혀 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 어류소상을 위한 암거어도에 대한 설계기준이 미비함에 착안하여 그것의 필요성과 효과를 제시하고자 하였다. 이러한 목적을 위한 시도로서 선정된 목표어종에 맞추어 수리학적으로 원형암거 어도를 설계하였으며, 설치된 어도에 대한 효과를 확인하기 위한 모니터링을 시행하였다. 2015년에 완공된 밀양 해천생태하천복원사업에서 해천과 밀양강을 연결하는 원형암거 어도에 대한 수리특성, 어류 소상 현황과 특징을 조사하고 분석하였다. 원형암거 어도설계에 적용된 수리변수와 현장조사 결과를 분석하여 설계 목표어종에 대한 적합성 여부를 검토하였으며, 암거어도의 어류소상에 대한 구조성능 평가기준을 설정하고 항목별로 평가하였다. 또한 원형암거 어도의 현장 적용성을 확인하기 위하여 출구부에 어류 포획망을 설치하여 어도를 이용하는 어종 및 개체수를 파악하고자 하였다. 연구결과는 국내에서 원형암거 어도의 설계기준 마련뿐만 아니라 국내 환경에 적합한 암거어도의 설계에 기초자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상지

밀양 해천은 조선 성종 10년 축조된 해자로서 밀양읍성을

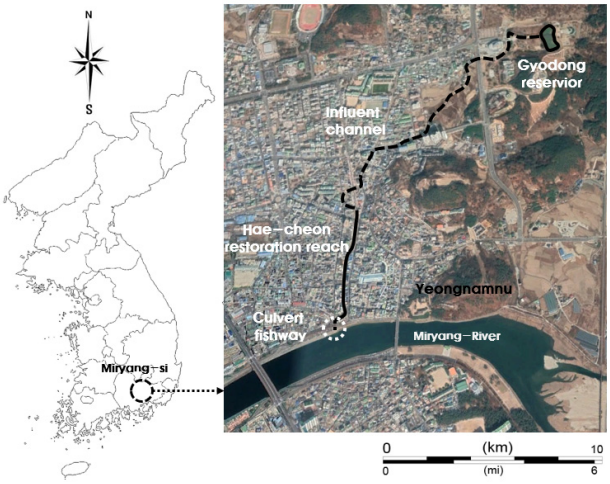


Fig. 1. Location map of site

Fig. 2. Photograph of Haecheon restoration

방어하기 위한 시설로서 당시 폭이 5.9 m 정도였으나 1993년 콘크리트로 복개되면서 도로·주차장 등의 교통시설과 하수구로 이용되었고, 복개도로 주변에 상가가 무분별하게 들어서면서 본래의 모습을 찾아볼 수 없게 되었다. 해천 주변의 이런 환경을 개선하기 위해 밀양시는 2007년 9월 환경부의 해천생태하천복원사업으로 선정하였으며, 2012년에 착공하여 2015년 12월에 준공하였다.

연구대상지는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 경남 밀양시 내일동과 내이동의 북성 사거리에서 밀양강까지 해천생태하천복원사업 시행구간으로서 연장은 700 m이고 평균하폭은 16 ~ 20 m이며, Fig. 2는 해천복원사업 후의 현황을 나타낸 것이다.

2.2 연구방법

2.2.1 원형암거 어도 설계 검토

해천 생태하천복원사업에서는 1일 14,000 m^3을 밀양강에서 양수하여 상류 교동저류지에 저류한 후 하류로 하천유지유량 0.16 m^3/sec 공급하는 것으로 계획되었으며, 해천의 밀양강 합류부에서는 제방을 경사 1/20로 관통하는 직경 1,500 mm의 강관을 압입하여 원형암거를 설치하였다. 암거의 총연장은 51.31 m로서 Fig. 3과 같이 유입부(Entrance, 5.95 m), 유출부(Exit, 2.63 m) 및 암거어도(Culvert fishway, 42.73 m)으로 구성되어 있다. 당초에는 연장 43.2 m, 직경 1,500 mm의 강관을 경사 1/20로 매설하고 어류소상을 위하여 도류벽식(baffle type) 암거어도를 설계하였으나, 2014년 12월에 밀양 해천생태하천복원사업의 어도설계 자문에서 어류소상 및 유사상황을 고려하여 도류벽식 암거어도를 6개소의 위어 배플(weir baffle)을 설치하는 어도로 변경하였다. 위어 배플(weir baffle)은 위어 마루에서의 완전월류를 위하여 모서리를 둥글게 가공한 두께 20 cm의 화강암(granite stone)으로 제작하였고, 암거에 브라켓(bracket)으로 고정하였다. Fig. 3은 해천의 밀양강 합류부에 설치된 암거어도 구간의 종단 및 내부구조와 위어 배플(weir baffle)의 규격을 나타낸 것이다.

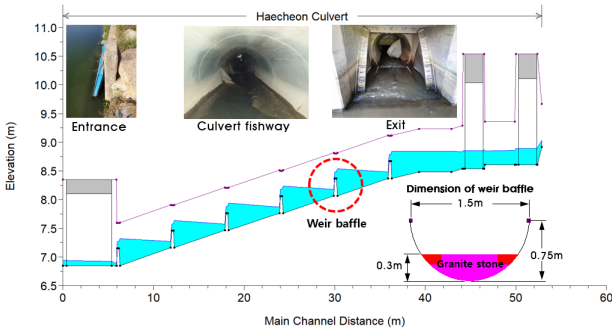


Fig. 3. Circular culvert system and dimensions of weir-baffle

Table 1. Locations and dates of monitoring

Monitoring locations	Monitoring date		
	Year	Month	Date
	2015	June	18-19
		August	27-28
	2016	May	18-19
	2017	May	23-24
	2018	May	27
	2019	May	2
		September	25
	2020	May	19
		September	11

2.2.2 모니터링

본 연구는 해천의 어류 서식환경 및 어종을 파악하기 위하여 해천생태하천복원사업 사후모니터링 결과를 분석하였다. 생태복원의 목표어종인 피라미의 소상을 위하여 설치된 암거어도의 효과를 검토하기 위하여 모니터링을 실시하여 어류소상과의 연관성을 도출하였다. Table 1은 해천생태하천복원사업 사후모니터링 지점과 날짜를 나타낸 것이다(Miryang City, 2020).

어류소상 모니터링은 암거어도내의 수심 및 유속(평균유속 : Valeport의 Model 001 flow meter로 측정)을 현장에서 조사하고, 어류 소상을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 1.25 m ×1.0 m×1.5 m (가로×세로×길이)인 직경 20 mm의 스테인레스 원관 골조에 망목 4 mm의 그물을 씌워 제작한 트랩 내부에 시중에서 판매되는 육각형 포획망을 조합하여 제작하였으며, 2020년 8월 24일 포획망을 현장에 설치하여 조사하였다.

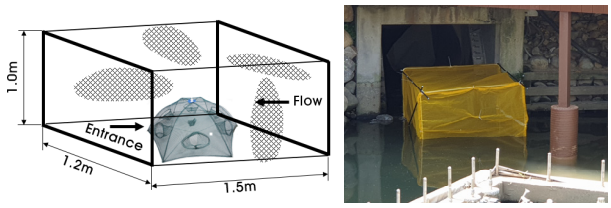


Fig. 4. Structure and dimensions of fish trap net

3. 결과 및 고찰

3.1 결과

3.1.1 암거어도의 설계검토

해천복원사업에서 생태계의 종적 연속성을 확보하기 위하여 설치된 원형암거 어도에 대한 수리학적 타당성 및 효율성을 검토하기 위하여 강관 연장 42.73 m를 포함한 총연장은 51.31 m의 암거에 대한 수리계산을 수행했다. 해천의 하천유지유량 0.16 m^3/sec는 전체 복원구간에 대한 하천경관, 친수활동 및 생태계 유지에 필요한 유량을 반영하였으며, 특히 생태유량은 밀양강의 대표어종인 피라미를 대상으로 하였다. 수리계산조건은 Table 2와 같이 원형암거에 위어 배플이 설치되지 않은 Case-A와 3.4 ~ 6.0 m의 간격으로 6개의 위어 배플이 설치된 Case-B로 나누고 HEC-RAS를 이용하여 수리계산을 수행한 결과를 Table 3에 제시하였다.

수리계산 결과 위어 배플이 없는 Case-A는 수심 0.20 m, 유속 1.12 m/sec 및 Froude 수 0.96의 일정한 흐름장이 형성되어 휴게공간이 없는 38.15 m의 암거구간을 소상할 수 있는 어류는 없을 것이라 판단된다. 6개의 위어 배플이 설치된 Case-B는 수심 0.12 ~ 0.48 m (위어 배플 마루 0.12 m), 유속 0.33 ~ 1.15 m/sec (위어 배플 하류단 1.15 m/sec) 및 Froude 수 0.18 ~ 1.04 (위어 배플 상류단 1.04)의 다양한 흐름장이 형성되고, 또한 어류가 위어 배플에 의해 형성된 풀(pool)을 휴게공간으로 활용하면서 원형암거 구간을 소상할 수 있는 환경을 제공하고 있다. 또한, 각 위어 배플 마루의 폭 0.2 m 구간에서 Froude 수가 1.0 ~ 1.04 이므로 한계류(critical flow)와 사류(super-critical flow) 흐름영역이 형성되며, 수위차가 22 cm 정도 발생함에 따라 위어 배플과 직하류의 흐름은 잠입류(plunging flow)가 형성되는 것으로 분석되었다. Figs. 5 ~ 7은 계산조건에 따른 HEC-RAS의 결과로부터 유속, 수심 및 Froude 수에 대한 원형암거 구간내의 종단변화를 나타낸 것이다.

Fig. 5는 암거 내에서의 유속변화를 나타낸 것이다. 암거 유입구과 유출구를 제외한 구간에서 위어 배플이 설치되지 않은 경우(Case-A)에 암거구간의 종단방향 유속은 1.12 m/sec로 일정하게 형성되었으나, 위어 배플이 설치된 경우(Case-B)에 암거구간의 종단방향 유속은 위어 배플 마루 상·하류단에서 1.07 ~ 1.15 m/sec이지만 배플 사이의 풀 구간에서는 0.33 ~ 0.58 m/sec로 크게 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 6은 암거 내에서의 수심변화를 나타낸 것이다. 위어 배플이 설치되지 않은 경우(Case-A)에 암거구간의 종단방향 수심 변화는 0.20 m로 일정하게 형성되었으나, 위어 배플이 설치된 경우(Case-B)에 암거구간의 종단방향 수심은 위어 배플 마루에서 0.12 m를 형성하고 배플의 직상류에서는 0.48 m, 배플 사이의 중간지점에서는 0.33 m 그리고 배플의 직하류단에서는 0.2 m 유지하는 것으로 나타났다. Fig. 7은 암거 내에서의 Froude 수의 변화를 나타낸 것이다. 위어 배플이 설치되지 않은 경우(Case-A)에 암거구간의 종단방향 Fr = 0.96 의 한계류에 가까운 상류가 형성되었으나, 위어 배플이 설치된 경우(Case-B)에 암거구간의 종단방향의 Froude 수는 위어 배플과 상·하류단에서 Fr = 0.99 ~ 1.04의 혼합류(mixed flow)가 발생하였으나 각 배플 사이의 중간지점에서는 Fr = 0.40, 위어 배플 직상류까지는 Fr = 0.18로 크게 감소하여 풀(pool)의 수리특성이 나타났다. 따라서, 원형암거에 대한 어류의 소상 가능성을 검토하기 위하여 위어 배플의 설치 유무에 따른 유속, 수심 및 Froude수를 분석한 결과 위어 배플을 설치하면 피라미 등의 유영어가 소상할 수 있는 흐름으로 개선할 수 있음을 확인하였다.

Table 2. Calculation condition of fishway

Case	Discharge (m^3/sec)	Diameter (mm)	Slope	Number of baffles	Remark
A	0.16	1,500	1/20	-	No-Weir baffle
B	0.16	1,500	1/20	7	Weir baffle

3.1.2 해천복원사업후 어류 모니터링 결과

해천생태하천 복원사업의 사업효과와 육상 동·식물상 및 육수생물상의 변화를 관찰하기 위하여 2015년부터 2020년까지 대상하천 및 주변지역을 중점적으로 현지조사를 실시하였다. 어류의 경우 Table 1과 같이 해천에 3개 대표지점(W-1 ~ W-3)을 선정하여 모니터링을 실시하였으며, Table 4는 그 결과를 정리한 것이다.

모니터링 조사결과에 의하면 2015년에는 잉어과(Cyprindae) 및 미꾸리과(Cobitidae)의 총 2과 2종, 2016년에는 잉어과 2종 및 미꾸리과 1종의 총 2과 3종, 2017년에는 잉어과 4종 및 미꾸리과 1종의 총 2과 5종, 2018년에는 잉어과 4종, 미꾸리과 1종 및 망둑어과 1종의 총 3과 6종, 2019년에는 잉어과 4종 및 미꾸리과가 1종의 총 2과 5종, 2020년에는 잉어과 3종 및 망둑어과 1종의 총 2과 4종의 어류가 분포하는 것으로 조사되었다. 2015년 밀양시에서 해천의 방류구 수역에 붕어 치어, 미

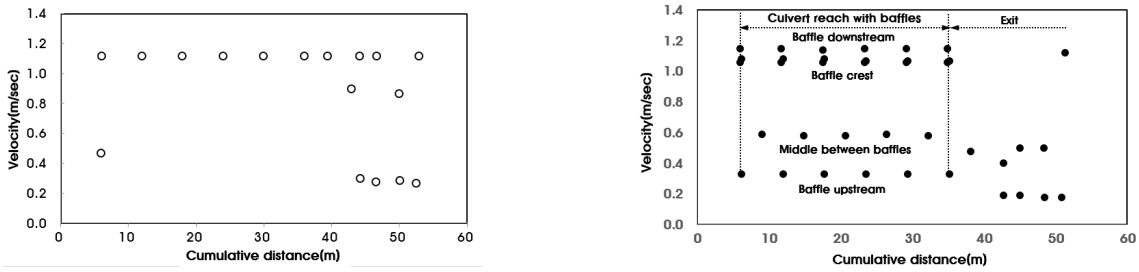
Table 3. Calculation results of culvert fishway

Culvert Station		Cumulative Length (m)		Q (m^3/sec)	Depth (m)		Mean velocity (m/sec)		Froude number		Remarks
A	B	A	B		A	B	A	B	A	B	
8.156	8.1560	51.31	51.31	0.16	0.20	0.20	1.12	1.12	0.96	0.96	
8.155	8.1550	50.83	50.83	0.16	0.30	0.44	0.27	0.26	0.16	0.15	
7.458	7.4580	48.33	48.33	0.16	0.24	0.35	0.87	0.82	0.68	0.63	
7.127	7.1270	45.03	45.03	0.16	0.29	0.43	0.28	0.24	0.16	0.13	
6.4	6.4000	41.75	42.73	0.16	0.23	0.41	0.90	0.48	0.71	0.30	
6	6.0000	38.15	38.15	0.16	0.20	0.37	1.12	0.48	0.96	0.30	
	5.2020		35.15			0.48		0.33		0.18	
	5.2010		35.15			0.12		1.07		1.04	Baffle
	5.0010		34.95			0.12		1.06		1.00	
5	5.0000	35.95	35.95	0.16	0.20	0.21	1.12	1.15	0.96	0.99	
	4.3102		32.25			0.32		0.58		0.39	
	4.2020		29.35			0.47		0.33		0.18	
	4.2010		29.35			0.12		1.07		1.04	Baffle
	4.0010		29.15			0.12		1.06		1.00	
4	4.0000	29.15	29.15	0.16	0.20	0.20	1.12	1.15	0.96	1.00	
	3.3102		26.45			0.32		0.59		0.40	
	3.2020		23.55			0.47		0.33		0.18	
	3.2010		23.55			0.12		1.07		1.04	Baffle
	3.0010		23.35			0.12		1.06		0.99	
3	3.0000	23.35	23.35	0.16	0.20	0.20	1.12	1.15	0.96	1.00	
	2.3102		20.65			0.32		0.58		0.39	
	2.2020		17.75			0.48		0.33		0.18	
	2.2010		17.75			0.12		1.08		1.04	Baffle
	2.0010		17.55			0.12		1.06		1.00	
2	2.0000	17.55	17.55	0.16	0.20	0.20	1.12	1.14	0.96	0.98	
	1.3102		14.85			0.32		0.58		0.39	
	1.2020		11.95			0.48		0.33		0.18	
	1.2010		11.95			0.12		1.08		1.04	Baffle
	1.0010		11.75			0.12		1.06		1.00	
1	1.0000	11.75	11.75	0.16	0.20	0.21	1.12	1.15	0.96	0.99	
	0.3102		9.05			0.32		0.59		0.40	
	0.2020		6.15			0.48		0.33		0.18	
	0.2010		6.15			0.12		1.08		1.04	Baffle
	0.0010		5.95			0.12		1.06		1.00	
0	0.0000	5.95	5.95	0.16	0.20	0.21	1.12	1.15	0.96	0.99	
-0.1	-0.1	5.90	5.90	0.16	0.23	0.23	0.47	0.47	0.32	0.32	

꾸라지, 메기 치어, 잉어 치어, 동자개 치어 등을 방류한 것으로 확인되었으나, 현지 조사시 미꾸라지, 메기 및 동자개는 출현하지 않았다. 2016년과 2017년부터 피라미와 갈겨니의 개체수가 증가하였고, 2018년과 2020년에는 밀어, 2020년에는 돌마자(*Microphusogobio yaluensis*)와 끄리(*Opsarochthys uncirostris amurensis*)가 포획되어 밀양강으로부터 다양한 어종이 원형암거 어도를 소상함을 알 수 있다(Miryang City, 2020).

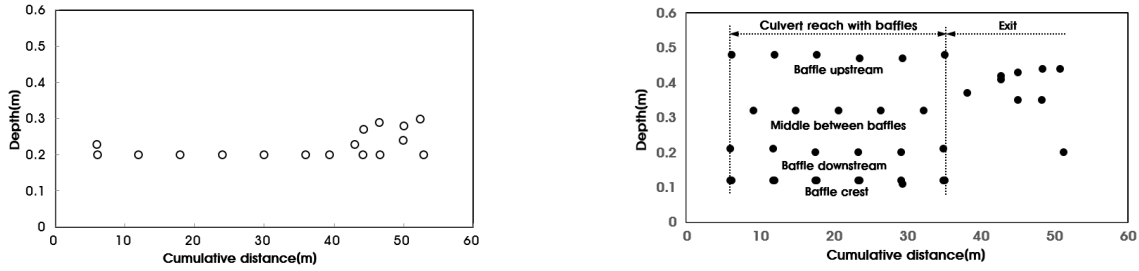
3.1.3 암거어도 어류소상 모니터링 및 평가

현재 해천복원구간 중 자갈 하상의 수심이 얕고 유속이 있는 여울구간에서는 다양한 크기의 피라미와 갈겨니가 발견되었고, 하류의 암거어도 출구인 분수대 주변 풀에는 많은 치어들이 유영하는 모습을 육안으로 확인할 수 있으며, 상대적으로 수심이 깊고 수초가 있는 곳에는 잉어와 붕어 무리를 관찰할 수 있다(Figs. 8(a) and (b)). 어류 모니터링 조사결과의 출현시기와 출현종을 고려하면 모든 어종이 밀양강으로부터 암거



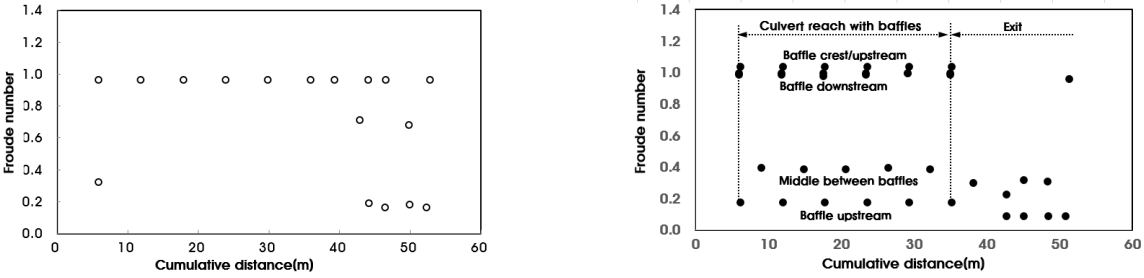
(a) No-weir baffle (Case-A) (b) Weir baffle (Case-B)

Fig. 5. Velocity variation of culvert profile



(a) No-weir baffle (Case-A) (b) Weir baffle (Case-B)

Fig. 6. Depth variation of culvert profile



(a) No-weir baffle (Case-A) (b) Weir baffle (Case-B)

Fig. 7. Froude number variation of culvert profile

어도를 통하여 소상한 것으로 추정되므로, 본 연구에서는 피라미를 목표종으로 설계한 원형암거의 위어 배플이 어도 소상기능을 발휘하고 있는지 확인하고 평가할 필요가 있어 2020년 8월 24일 어도 출구(Fig. 9(b))에 포획망을 설치하여 모니터링하였다. 원형암거 어도 포획 모니터링에서 총 1과 2종의 36개체가 포획되었으며, 이 중에는 대표어종인 피라미(*Zacco platypus*) 27개체와 갈겨니(*Zacco temminckii*) 9개체가 어도를 이용하는 것으로 나타났다. 어도 출구에서 포획된 피라미와 갈겨니의 체장 범위는 5 cm급 ~ 12 cm급으로 다양한 크기의 어류가 소상하는 것을 확인하였으며, 전체 개체수의 약 83%가 체장 6 cm급 ~ 11 cm 급으로서 유영력이 큰 개체인 것으로 분석되었다(Table 5).

따라서, 현재 해천의 전구간에서 육안으로 관찰되는 피라미, 갈겨니, 끄리 및 돌마자는 밀양강에서 원형암거 어도를 소상하여 서식하고 있음을 알 수 있다. 특히, 2018년과 2020년 모니터링에서 밀어(*Rhinogobius brunneus*)와 같은 소형의 저서성 어류가 발견됨으로써 대부분의 어류가 어도를 이용할 수 있음을 확인하였다(Miryang City, 2020).

어류 소상모니터링 수행시의 원형암거 어도의 수리특성을 파악하기 위하여 위어 배플에서 측정된 월류수심 0.09 m를 활용하여 유량 0.11 m^3/sec를 산정하였고, 위어 배플 사이 휴게 풀의 최대수심과 평균유속은 배플 직상류단에서 0.43 ~ 0.45 m와 0.25 m/sec, 위어 배플 사이의 중간지점에서 0.28 ~ 0.29 m와 0.46 ~ 0.48 m/sec 그리고 배플의 직하류단에서 0.16 ~ 0.17 m와 1.08 ~ 1.10 m/sec로 측정되었다.

원형암거 어도의 효율은 입구제어, 출구제어, 수심 및 유속

Table 4. Current status of fish species inhabiting Haecheon

Scientific Name	2015						2016			2017			2018			2019						2020					
	1st half			2nd half			1st half			1st half			1st half			1st half			2nd half			1st half			2nd half		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Family Cyprinidae																											
Carassius auratus	-	-	1	4	3	7	6	5	7	8	4	2	-	4	-	-	2	3	12	2	-	6	10	7	-	6	5
Microphusogobio yaluensis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-
Pungtungia herzi Herzenstein	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-
Opsarochthys uncirostris amurensis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Zacco platypus	-	-	-	-	-	-	11	8	19	6	19	25	84	42	55	59	30	22	8	8	11	12	25	31	10	16	18
Zacco temminckii	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	21	9	15	17	6	11	14	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyprinus carpio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	11	-	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	2	-
Family Cobitidae																											
Misgurnus anguillicaudatus squalidus	1	3	2	2	5	3	1	1	2	-	2	1	-	-	1	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Family Gobiidae																											
Rhinogobius brunneus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
Number of species	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	5	4	3	4	4	2	4	5	2	4	1	2	4	2	2	3	3
Appearance numbers	1	3	3	6	8	10	18	14	28	27	57	37	100	64	63	70	47	32	20	14	11	18	40	38	15	24	26
Dominant species	*Carassius auratus*						*Zacco platypus*			*Zacco platypus*			*Zacco platypus*			*Zacco platypus*			*Carassius auratus*			*Zacco platypus*			*Zacco platypus*		

(a) Carps and *Zacco platypus* (b) *Zacco platypus*

Fig. 8. Photographs of swimming fishes

(a) Inlet (b) Outlet (exit of fishway)

Fig. 9. Photographs of water supply system

Table 5. Numbers of captured fishes by body length (fish capture monitoring)

Species \ Body length	5 ~ 6 cm	6 ~ 7 cm	7 ~ 8 cm	8 ~ 9 cm	9 ~ 10 cm	10 ~ 11 cm	11 ~ 12 cm	12 ~ 13 cm	Total
Zacco platypus	1	5	6	4	5	4	2	-	27
Zacco temminckii	-	-	2	1	2	1	-	1	7

에 따라 달라지기 때문에 다른 형식의 어도와 직접적인 비교가 어렵지만(Bunt *et al*., 2012), 해천 원형암거 어도는 밀양강 본류에 직접 연결되어 있어 밀양강에 서식하는 모든 어류가 잠재적으로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

캘리포니아 어업수렵국(California Department of Fish and Game)(Harris, 2005)은 암거어도 효율성 평가 모니터링의 목적과 범위로서 어도설치에 대하여 복원사업 계획의 실행 정도와 목표 달성 정도를 확인하고, 어류 및 수생생물의 복원대책이 긍정적인 방향으로 반응하는가를 모니터링 하도록 제안하고 있다. 또한, 모니터링 방법으로서는 Table 6에 제시한 바와 같이 4개 항목 11개 지표에 대하여 효율성 기준, 매개변수 및 현장 모니터링 조사방법을 제시하고 있다. 현장 모니터링 조사방법 1(Field Method 1)에서는 암거어도를 포함하는 상·하류의 최심종단에 관계되는 조사로서 목표어종 및 생애 단계별

Table 6. Monitoring questions, parameters, effectiveness, criteria and field methods (Harris, 2005)

Monitoring Question	Effectiveness Criteria	Parameters	Field Methods
1. Is the project still functioning as designed?	-	Fish passage restoration project is within DFG passage guidelines.	-
a. Is there still a sufficient jump pool depth for targeted species and life stages?	Residual pool depth at downstream outlet (if culvert outlet is perched or has entry leap).	If there is a jump, pool depth is appropriate for leap height. (Not required for no entry leap.)	Field Method 1 : Thalweg profile through culvert plus water depths.
b. Are leap heights still within jumping ability for targeted species and life stages?	Leap height (residual pool water surface elevation to passage outlet).	Leap height is below critical heights for targeted species and life stage. (Not applicable for no entry leap.)	Field Method 1 : Thalweg profile through culvert.
c. Is stream velocity in critical flow areas still within the swimming ability of the target species and life stages?	Stream velocity in critical area.	Stream velocity is equal to or less than swimming ability of target species and life stage.	Field Method 3 : Stream velocity/ discharge measurements.
d. Is upstream inlet of the passage area/structure still at grade or below the channel bed?	Bed elevation at inlet and inlet elevation.	Culvert inlet matches grade of the natural channel bed.	Field Method 1 : Thalweg profile. Through culvert.
e. Is the passage area/structure still at grade?	Slope.	Passage structure is at specific designed slope or the slope relative to the natural channel.	Field Method 1 : Thalweg profile. Through culvert.
f. Can sediment bed load still pass through the restored area?	Slope (top riffle to opening), active channel width, hydraulic capacity.	Passage inlet shows no signs of clogging or deposition.	Field Method 1 : Thalweg profile. Through culverts. Field Method 2 : Cross section surveys.
g. Can the structure pass the design flood discharge and meet headwater policies?	Hydraulic capacity	Passage passes 100-yr flows and watershed products.	Field Method 2 : Cross section surveys
h. Does the passage project show signs of imminent failure?	Structural integrity.	Structure shows no signs of collapsing.	Field Method 1 : Thalweg profile. Through culverts. Field Method 2 : Cross section surveys.
2. Have channel or bank adjustments impaired the function of the passageway?	Slope, head-cutting, sediment deposition.	Channel adjustments have not impaired passage or habitat values.	Field Method 1 : Thalweg profile. Through culverts.
3. Did the project have adverse effects on upstream or downstream habitat?	Bank erosion, channel incision/head-cutting, debris accumulation or sediment deposition.	Passage project has not adversely affected up and downstream habitat.	Field Method 1 : Thalweg profile. Through culverts. Field Method 2 : Cross section surveys.
4. Is upstream habitat still suitable for the targeted fish species and life stages?	Habitat types and quality in upstream reaches.	Area is still suitable for targeted species and life stages.	Habitat monitoring. See Monitoring the Effectiveness of Instream Habitat Restoration

※ DFG : California Department of Fish and Game

입구 및 출구의 연속성을 평가하기 위한 조사로서 입구의 도약 높이 및 풀의 수심, 경사, 입구 폐색과 퇴적, 구조물 손상 및 상·하류 하도조정에 따른 소상 방해나 서식지 손상 등을 포함하고 있다. 현장 모니터링 조사방법 2(Field Method 2)에서는 암거어도의 횡단면 조사로서 100년 빈도의 홍수량의 통수능과 유역에서 발생되는 물질 수송력 등이다. 현장 모니터링 조사방법 3(Field Method 3)에서는 암거어도 구간의 유속과 유량 측정조사로서 유속이 목표어종 및 생애 단계별 유영력에 대하여 적합성 여부를 평가하는 것이다. 그리고 하천 서식처 복원효과 모니터링에서는 목표어종 및 생애 단계별 상류 서식지가 적합한지를 서식지 유형과 질로서 평가하는 것이다.

밀양 해천에 설치된 암거어도는 위어 배플을 설치하여 입구인 하류의 밀양강과 출구인 상류의 해천을 안정적인 종적 연속성을 확보하도록 계획·시공하였으므로 앞에서 제시한 1) 암거어도의 설계검토 내용과 2) 해천복원사업후 어류 모니터링 결과를 분석한 결과, Table 6에 제시된 항목 및 지표 중 1의 g를 제외하면 모든 지표 조건을 만족시키며, 해천복원 사업후 모니터링과 암거어도 어류소상 모니터링 결과가 이를

뒷받침하고 있다. 다만, 해천은 홍수량을 원형암거를 통하여 방류하는 것이 아니라 다른 배수문을 통하여 밀양강으로 배수하므로 Table 6에서 1의 g의 지표는 해당되지 않는다.

3.2 고찰

하천설계기준의 하천어도에 의하면 어도 설계조건으로 유속의 범위를 0.5 ~ 1.0 m/sec로 제시하고 있는데(MLIT, 2018), 해천 원형암거 어도의 경우 폭 20 cm의 위어 배플 상·하류단의 상류단의 접근유속과 하류단의 잠입류로 인하여 아주 짧은 구간에서 한계유속이 발생하나 위어 배플 사이의 휴게 풀에서는 기준 유속범위 보다 느리게 유지되므로 작은 크기의 어류뿐만 아니라 다양한 생활사를 가진 개체들이 어도를 이용하는데 도움이 되었을 것으로 판단된다.

Park *et al*. (2008)은 피라미의 경우 수로의 평균유속이 0.7 ~ 0.8 m/sec 사이에서 소상성공율의 급격한 하락을 보이고 있으며, 평균유속 1.0 m/sec 이상에서는 거의 소상하지 못하는 것으로 제시하고 있다. Izumi *et al*. (2009)은 하천의 어도 속에 원형관(직경 10 cm, 길이 4 m, 경사 1 : 14 ~ 1 : 23)으로 스태미너 터널(stamina tunnel)를 설치하고 관내 유속이 2.11 m/sec ~ 2.79 m/sec의 고유속 조건에서 야생의 유영어 6종류(은어 - 157개체, 평균체장 7.1 cm ; 황어 - 137개체, 평균체장 5.8 cm ; 버들치 - 57개체, 평균체장 5.8 cm ; 피라미 - 130개체, 평균체장 10.1 cm ; 산천어 - 11개체, 평균체장 6.6 cm ; 참붕어 - 3개체, 평균체장 6.2 cm)와 저생어 2종류(둑중개 - 3개체, 평균체장 8.2 cm ; 밀어 - 8개체, 평균체장 4.2 cm)의 총 8종류 506개체를 이용하여 자연 유도식 유영실험을 수행하여 유영특성, 돌진속도에 대하여 조사했다. 모든 소상실험조건에서 은어, 황어, 피라미, 버들치의 4종류가 대부분 소상하였고, 피라미가 가장 넓은 유속조건 범위에서 계측되었다. 돌진속도는 1 ~ 5초간 지속하는 최대유영속도라는 정의(Blaxter, 1967)에 따라 Izumi 등(2007)이 분석한 결과 해천의 소상어종으로 판단되는 관내 최대유영속도는 은어 2.29 m/sec(체장 : 7.8 cm)로부터 피라미 3.83 m/sec(체장 : 10.3 cm)의 범위로 나타났다. 체장 7 ~ 8 cm급 피라미의 경우 관내유영속도 2.55 ~ 2.85 m/sec의 범위에서 2 ~ 7초 동안 유영하며, 동일 체장의 은어는 경우 관내유영속도 2.70 ~ 3.10 m/sec의 범위에서 2 ~ 5초 동안 유영하는 것(Onitsuka *et al*., 2008 ; Kouki *et al*., 2008)으로 나타나 해천 원형암거 어도의 설계유속은 적합한 것으로 확인되었다. 일반적으로 암거어도에서 어류가 위어 배플을 통과는 형태는 체장, 유속 및 수심 등에 따라 다르지만 대체적으로 유영력에 따라 좌, 우 및 중앙을 소상하며, 유영력이 작은 어류는 유속이 느린 좌측과 우측을 선호하는 것으로 제시되고 있다 (Pearson *et al*., 2006). 피라미와 은어는 유영속도가 빠르기 때문에 2.0 m/sec 이상의 흐름장을 통과할 수 있는 유영력이 있지만, 유영시간이 2 ~ 7초 정도의 범위로서 연장이 긴 암거는 통과할 수 없으므로 휴게풀(rest pool)을 형성하기 위한 배플의 설치가 필요하다. 해천복원 사업후 어류 모니터링에서 확인된 밀어는 평균체장 4.2 cm인 8개체에 대한 유영능력은 평균유영거리 14 cm, 평균유영시간 0.4초, 평균유영속도 3.06 m/sec로 조사되었으며, 빨판으로 들러붙으면서 위어 배플을 소상하는 것으로 알려지고 있다(Izumi *et al*., 2009). 따라서 해천의 원형암거 어도는 위어 배플에 의한 휴게풀이 형성되므로 모니터링에서 확인된 모든 어종이 소상 가능한 것으로 볼 수 있다.

미국과 캐나다에서 연어 및 송어 등의 소상을 고려하여 원형암거에 적용되는 어도는 오프셋 배플(offset baffle), 슬롯형 위어 배플(slotted weir baffle) 및 위어 배플(weir baffle)을 표준으로 하고 이것들을 변형시킨 스포일러 배플(spoiler baffle), 알버타 피쉬위어(Albert fishweir)과 알버타 피쉬배플(Albert fishbaffle) 등이 있다. 암거어도가 적용되는 경사는 일반적으로 0 ~ 5 %의 범위이며, 홍수시의 통수능을 고려하여 배플의 높이는 암거직경(D)의 0.07 ~ 0.20 D, 배플 설치간격은 0.3 ~ 2.4 D 범위로 제시되고 있다(Ead *et al*., 2002). 원형암거 어도는 하천에 설치되는 어도와는 흐름장의 특성이 다르므로 직접 비교할 수는 없다.

본 연구에서는 하천유지유량만을 대상으로 암거어도를 설계하였으므로 홍수량에 대한 검토는 수행하지 않았다. 홍수시 흐름을 고려할 경우에는 직경과 수심비, 퇴사 및 직경과 배플 설치간격비 등을 고려하여야 할 것이다.

4. 결 론

지금까지 도로 및 제방을 횡단하는 원형암거가 전국적으로 상당히 많이 설치되고 있지만, 어도가 설치된 사례는 거의 없으며, 암거어도의 설치에 대한 설계기준도 마련되어 있지 못한 것이 현실이다. 따라서, 향후에 설치되는 암거는 어류 생태계의 종적 연속성을 고려하여 설계기준을 마련하는 것이 시급하다.

본 연구에서는 원형암거 어도의 수리특성과 어류의 유영특성 및 적용성을 비교·검토하기 위하여 2015년 12월에 완공된 밀양 해천생태하천복원사업에서 해천과 밀양강을 연결하는 원형암거 어도에 대한 수리특성, 어류 소상 현황과 특징을 조사·분석하였으며, 요약하면 다음과 같다.

배플을 설치하지 않은 일반적인 원형암거의 경우 암거 전체 구간이 일정한 수심과 유속이 형성되기 때문에 유영력은 크지만 유영시간이 짧은 은어 및 피라미가 소상할 수 없으므로 어류소상을 돕기 위해서는 반드시 휴게풀이 있는 어도의 설치가 필요함을 확인하였다.

원형암거에 위어 배플을 설치한 경우에 대한 수리계산 결과 수심은 최대 약 240% 증가하였고 유속은 최대 약 70% 정도 감소하여 하천성 어류의 소상 조건을 만족시키므로 대표어종인 피라미뿐만 아니라 다른 다양한 어종의 소상이 가능함을 입증하였다.

사업후 모니터링에서 채집된 어종과 어류 소상 모니터링에서 포획된 어종을 분석한 결과, 원형암거 어도 설계시 대표어종으로 선정된 피라미와 유영능력 및 서식조건이 유사한 갈겨니, 끄리 및 돌마자가 소상하는 것으로 확인되었으며, 수질조건이 개선되면 유영능력과 서식 조건이 피라미와 유사한 은어도 소상할 수 있을 것으로 사료된다.

앞으로 건설되는 도로 및 제방 등을 횡단하는 암거에 어도를 설치하도록 설계기준 및 지침 개발과 이미 설치된 암거에 대한 생태통로로서의 기능 평가 및 어도를 설치 등의 제도적인 대책이 필요함을 확인하였다.

본 연구결과는 제방을 관통하는 원형암거에 대한 사례 연구에 불과하며, 미국과 캐나다 등에서 제시하고 있는 암거어도에 대한 설계기준을 참고하여 국내의 자연환경 특성 및 서식 어류의 특성을 고려한 암거재료 및 형식에 따른 추가적인 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구년 지원에 의해 연구되었습니다.

References

Beaver, J., and McGrath, T.J. (2005). “Management of Utah highway culverts.” *Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board 1904(1), Transportation Research Record, p.113-123

Blaxter, J.H.S. (1969). “Swimming speeds in fish.” *Proceedings of the FAO Conference on Fish Behaviour in relation to Fishing Techniques and Tactics*, Bergen, Norway, pp. 69-100.

Bunt, C.M, Castro-Santos, T., and Haro, A. (2012). “Performance of fish passage structures at upstream barriers to mitigation.” River Research Application, Vol. 28, pp. 457-478.

Dane, B.G. (1978). *A review and resolution of fish passage problems at culvert siteds in British Columbia*. Department of fisheries and Environment, Pacific Region, Fisheries and Marine Service, Technical Report. No. 810, p. 126

Duguay, J., and Jay Lacey, R.W. (2015). “Effect of fish baffles on the hydraulic roughness of slip-lined culverts.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 141, No. 1, 04014065.

Ead, S.A., Rajaratnam, N., and Katopodis, C. (2002). “Generalized study of hydraulics of culvert fishways.” *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 128, No. 11, pp. 1018-1022.

Harris, R. (2005). *Monitoring the effectiveness of culvert fish passage restoration*. No. P0210566, California Department of Fish and Game, Salmon and Steelhead Trout Restoration Account Agreement, Los Angeles, C.A., U.S., pp. 3-23.

Izumi, M., Yamamoto Y., Yataya, K., and Kamiyama, K. (2009). “Burst speed of wild fishes under high-velocity flow conditions using stamina tunnel with natural guidance system in river.” *Irrigation, Dranage and Rural Engineering Journal*, No. 261, pp. 73-82.

Izumi, M., Yataya, K., Azuma, N., Kudo, A., and Kato, K. (2007). “On-site swimming experiment of burst speed of Pale Chub with a stamina tunnel using natural river down-flow water.” *Proceedings of hydraulic engineering*, JSCE, Vol. 51, pp. 1285-1290.

Kane, D.L., and Wellen, P.M. (1985). *A hydraulic evaluation of fish passage through roadway culverts in Alaska*. Rep. No. FHWA-AK-RD-85-24, State of Alaska, Department of Transportation and Public Facilities, A.K, U.S.,pp. 17-38.

Katopodis, C. (1977). “Design of culverts for fish passage.” *Proceeding 3rd National Hydrotechnical Conference*, May 30-31, Canadian Society of Civil Engineering, pp. 949-971.

Ken Bates, P.E. (2003). *Design of road culverts for fish passage*. Washington Department of Fish and Wildlife, pp. 19-28.

Kouki, O., Juichiro, A., Akiyoshi, Y., and Yohei, I. (2008). “Variation of burst speed of *Zacco Platypus* with changing body length and flow velocity.” *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 52, pp. 1183-1188

Macdonald, J.I., and Davies, P.E. (2007). “Improving the upstream passage of two galaxid fish species through a pipe culvert.” *Fisheries Management and Ecology*, Vol. 4, No. 3, pp. 221-230.

Macpherson, L.M., Sullivan, M.G., Foote, L., and Stevens, C.E. (2012). “Effects of culverts on stream fish assemblages in the alberta foothills.” *North American Journal of Fisheries Management*, Vol. 32, No. 3, pp. 480-490.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2018). *Korean Design Standard*. KDS 51 40 10 : 2018, pp. 1-6.

Miryang City (2020). *Post-monitoring results of ecological river restoration project*. Technical Report, pp. 121-127.

Onitsuka, K., Akiyama, J., Yamamoto, A., and Iiguni, Y. (2008). “Variation of burst speed of *Zacco platypus* with changing body length and flow velocity.” *Proceedings of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 52, pp. 1285-1290.

Park, S.Y., Kim, S.J., Lee, S.H., and Yoon, B.M. (2008). "An experimental study on the swimming performance of pale chub (*Zacco platypus*)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 4, pp. 423-432.

Pearson, W.H., Southard, S.L., May, C.W., Skalski, J.R., Townsend, R.L., Horner-Devine, A.R., Thurman, D.R., Hotchkiss, R.H., Morrison, R.R., Richmond, M.C., and Deng, D. (2006). "Research on the upstream passage of juvenile salmon through culverts: Retrofit baffles." *Battelle Memorial Institute Pacific Northwest Division*. Prepared for Washington State Department of Transportation. Richland, Washington DC, U.S., pp. 16-44.

Pringle, C. (2003). "What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important?" *Hydrological Processes*, Vol. 17, No. 13, pp. 2685-2689.

Rajatnam, N., and Katopodis, C. (1990). "Hydraulics of culvert fishways III: Weir baffle culvert fishways." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 556-568.

Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Lodewyk, S. (1988a). "Hydraulics of offset baffle culvert fishways." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 1043-1051.

Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Mainali, A. (1988b). "Plunging and streaming flows in pool and weir fishways." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, pp. 939-944.

Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Mcquitty, N. (1989). "Hydraulics of culvert fishways II : Slotted-weir culvert fishways." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 16, pp. 375-383.

Warren, M.L., and Pardew, M.G. (1998). "Road crossings as barriers to small-stream fish movement." *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 127, No. 4, pp. 637-644.