

지하이동통로가 구비된 다기능 어도의 안정성 검토

Stability Analysis of Multi-Functional Fishway with Underground Passage

이 영 재^{1)*}

Young-Jae Lee

Abstract

In this paper, Reinforced concrete (R/C) and R/C+steel plate concrete slab was carried out by SAP2000 software program in order to compare the stability of the multi-functional fishway, that is Bonggok fishway, built at Bonggok river recently in Gumi city, when the size of underground passage is 1m×0.2m, 1m×0.4m, 1m×0.6m and the velocity is 0.8m/s, 1.2m/s, 1.6m/s respectively for the S2 (R/C+S/C).

The analysis shows the maximum stress of S2 decreases less 26~50% than that of Bonggok, bending moment of sidewall decreases less 28~54%, maximum stress of side wall decreases less 17~31%, bending moment of upper slab decreases less 24~47%, maximum stress of upper slab decreases less 4~20%, and bending moment decreases less 10~27% than that of Bonggok. The complementation is required as much as the following percent; 27% and 25% for the maximum stress and bending moment of underground passage, 15% and 24% for the side wall maximum stress and bending moment, and 10% and 14% for the upper slab maximum stress and bending moment, respectively.

This result shows that the S2 is greatly superior to that of the Bonggok fishway, and underground passage size of 1m×0.4m is superior to that of 1m×0.2m or 1m×0.6m, and R/C+S/C slab is superior to that of R/C slab.

This result is expected to be the basic data for the construction and design of the multi-functional fishway.

Keywords : Multi-functional fishway, Bonggok fishway, Reinforced concrete slab (R/C Slab), Reinforced concrete+Steel plate concrete slab (R/C+S/C Slab), Underground passage

1. 서론

어도는 보나 댐의 건설로 하천에 물고기 및 수생생물의 산란을 위한 이동을 불가능하게 하는 방해물이 있을 때 그 이동 목적을 달성시킬 수 있도록 만들어진 수로 형식의 이동 통로이다. 어도는 보 건설시 부속시설로서 생태학적 기능 및 안정성이 별다른 규제 없이 목인되어 온 점 또한 부정할 수 없는 사실이다. 따라서 국내·외에서는 공영 개발과 환경 보존 및 인간과 자연의 공존에 대한 방안이 증가하면서 국내의 하천에 대부분을 차지했던 단지 슬래브에 블록 형태인 아이스하버식 어도를 대체할 필요성으로 인해 구조적 및 생태학적 기능이 반영된 다기능 어도에 대한 연구가 진행되고 있다

(Cho, 2013; Kim, 2013). 또한 지하이동통로 시설 등 시스템으로 구성된 다기능 어도가 국내 환경에 적합함을 주장하였다 (Lee, 2011; Kim, 2013; Lee et al., 2014). 기존 건설된 5,400여개 어도 중 대부분은 물고기의 이동습성을 근본적으로 반영하지 못한 설계로 1/20 의 경사로 철근콘크리트 슬래브에 단순하게 역 T형 어도 블록만을 가로로 연결한 것이 전부이다. 또한 홍수 때 동반되는 모래, 자갈 등을 차단하는 시설이 없기 때문에 어도 블록 주위를 매몰시켜 보 주위까지 퇴적시키면서 어도의 기능을 발휘 못하고 있는 것이 현실이다. 한국의 하천은 90% 이상이 건천이라는 사실을 고려하지 않고 단순하게 외국의 어도를 모방하고 전문가의 자문 없이 기술자의 상상에 의하여 시공함으로써 생태계를 교란시키는

1) 정희원, 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 교수

* Corresponding author : yjlee01@knu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

심각한 문제이다 (Korea Water Resources Corporation et al., 2004). 기존 조립식 아이스하버식 어도들은 3차원 구조 해석이 누락되어 경제성 및 안정성이 확보된 설계의 개선이 요망된다 (Lee, 2011; 2013).

성장 논리에 가려 파괴된 생태계 복원을 위해 어도 분야의 심각성을 지적한 연구들이 늘어나고 있다 (Park et al., 2008; An, 2008; Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2009; Byun, 2011). 최근에 개발된 다기능어도는 물고기들의 산란기나 갈수기에도 수심 확보가 가능하게 지하이동통로가 구비되어 있으며 홍수 때 빠른 유속으로 동반되는 모래, 자갈들이 지하이동통로 출구부에 대한 충격과 매몰시킴을 방지하는 유입물 차단시설이 구비된 90여종의 회귀성 물고기 등 생태계 보존을 위한 대표적인 어도 시설물이다. 다기능 어도가 국내 하천에 시공된 사례를 중심으로 지하이동통로의 규격 및 유속의 차이에 따른 어도의 안정성이나 유지관리 및 어도 본체의 시공성 등 3차원 구조해석을 통한 안정성 검토가 요구되는 시점이다. 따라서 국내 하천에 새로운 형태인 다기능 어도 시설물의 안정성 검증을 위한 설계식과 비교를 통해 내구 특성을 검토 수행하였다.

1.1 지하이동통로가 구비된 다기능어도의 연구배경

국내의 어도 연구는 시설분야 보다는 주로 물고기들의 종의 개체수에 의한 분포도에 관한 내용들이 활발하게 진행되어 왔다. 어도 건설 후 물고기들의 모니터링 분야는 어도의 구조가 어떤 어류의 이동 조건에 적절한지를 조사 하였으나 (Kim et al., 1994; 1996; Park, 2001a) 어도의 시설분야에 대한 연구는 대단히 미흡한 실정이다 (Park et al., 2008; Lee, 2011). 물고기들의 이동시기가 계절적으로 갈수기인 산란기에 적절한 규모의 지하이동통로의 안정성을 검증하였다 (Lee, 2013).

하천 어도의 경우 국내의 하천특성 및 생태계의 특성을 반영하지 못하였다 (Park, 2001). 국내·외의 어도설치 사례 조사와 향후 우리나라 대형 댐에서의 어도설치에 관한 타당성 여부를 연구하였다 (Ju, 2005). 읍셋배플형 암거식 어도를 설치전과 비교에서 유속 1.2m/s 경우에는 높이 5cm의 읍셋배플 설치 후 유속의 저감으로 피라미의 소상 성공률이 20% 개선됨을 확인하였다 (Park et al., 2008). 한국형 다기능어도 시설물의 안정성 검토를 위하여 유속완화날개의 각도를 구조해석 프로그램으로 규명하였다 (Kim, 2013).

2012년 11월에 농수산식품부에서 주최한 1차 국가어도세

미나에 특별 초청된 일본의 전문가는 어도는 단순 블록이 아닌 지하이동통로 등 시스템으로 구성되어야 함을 주장하였다 (Watanabe Sigeru, 2012).

기존에 건설된 어도의 가장 큰 문제는 국내 하천의 특징인 홍수 시 많은 수량으로 단 며칠만 어도 기능이 회복되고 산란기가 계절적으로 갈수기로 물이 없기 때문에 물고기의 이동이 불가능한 것이다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 유일한 대체 어도는 다기능 어도이다 (Cho, 2013). 다기능어도는 홍수 때 유입되는 자갈, 모래, 토립자 등이 어도 내에 퇴적되는 것을 막아주는 유입물 차단시설과 갈수기에도 물고기의 이동이 가능한 지하이동통로, 상부 슬래브 어도, 집어 시설, 수문 등으로 구성된 어도 시스템이다 (Cho, 2013). 어도는 물고기들이 산란을 위해 바다에서 하천으로 또는 그 반대 방향과 같은 하천의 상류나 하류로 이동이 가능하게 유영력을 확보할 수 있는 최소한의 수심 확보가 필수적인 요건이다. 다기능어도는 지하이동통로 구비로 적은 수량으로 4계절 어도 기능이 가동되는 것이 특징이다 (Kim, 2013).

암거식 어도의 배플은 어류가 수로를 이동하는 동안 휴식공간과 지속적인 저유속 조건을 유지하기 위해 설치된다 (McKinly and Webb, 1956). 배플은 하천으로 흘러가는 나뭇가지나 검불, 토사 등을 차단하여 수로 입구나 배플 사이에 퇴적을 유발한다 (Baker and Votapka, 1990). 뉴질랜드의 어도 지침서는 물고기들의 유영특성을 다양하게 실험적 연구결과를 제시하였다 (Boubee et al., 1999). 미국은 홍수 시에는 홍수 소통 기능, 평상시에는 어도기능이 발휘될 수 있도록 설계하고 있다 (Bates et al., 2003).

국내의 어도의 시설분야에 관한 연구가 아직 미미한 수준에 머물러 있으며 기존 건설된 대부분의 어도 문제점이 개선된 다기능 어도에 대한 활발한 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 최근 건설된 다기능 어도의 해석된 자료의 검증을 위해 유속별, 지하이동통로 규격 및 재질별로 분류하여 상부슬래브, 측벽, 지하이동통로 출구부로 구분하여 구조해석을 수행함으로써 건천에서 물고기의 이동이 용이한 다기능 어도 관련 설계 지침 및 관리기준의 정립 자료가 필요한 실정이다.

1.2 연구의 내용 및 방법

본 논문에서는 다기능 어도의 안정성 검토를 위해 2010년에 완공된 경북 구미시 봉곡천 (이하 봉곡천 어도라 칭함) (Gumi-Si, 2010)과 경북 울진군 기성면 척산천의 다기능 어

도 (Gyeongbuk Province, 2013) 중에서 대표적으로 봉곡천 어도의 설계 규격을 검증의 비교 자료로 선정했다.

해석변수는 다기능어도의 상부슬래브 (지하이동통로의 천정부에서 상부의 슬래브까지 높이)와 지하이동통로 출구부 (지하이동통로 상류 측 입구), 측벽 (하상 기초에서 보 까지 높이)등 3가지 부재의 안정성을 검토한다.

해석 변수는 봉곡천 어도의 실제 지하이동통로 규격인 가로 × 세로 (1m × 0.4m) 와 상부 슬래브는 철근콘크리트+스틸 슬래브 (Reinforced Concrete + Steel Concrete Slab, R/C+S/C Slab, 슬래브 두께 : 0.1m, steel 두께: 0.004m)이다. 지하어도 재료는 철근콘크리트 슬래브 (Reinforced Concrete Slab, R/C Slab, 슬래브 두께 : 0.1m)와 R/C+S/C Slab, 유속은 피라미의 평균 유영력 1.2m/s를 기준하였으며 유속 변수로 0.8m/s, 1.2m/s, 1.6m/s로 지하이동통로 규격은 가로×세로를 각각 1m × 0.2m, 1m × 0.4m, 1m × 0.6m로 결정하여 구조해석을 통해 설계식과 비교하여 구조 안정성을 확인한다.

2. 다기능어도의 구조 해석

2.1 해석 개요

본 논문에서는 어도 콘크리트 슬래브 구조의 유속저항성능에 영향을 미칠 수 있는 설계인자들의 영향을 검토하기 위해 봉곡천 어도에 적용된 다기능 어도의 설계식과 3차원 구조해석을 수행하였다.

Figs. 1, 2와 3은 구미시 봉곡천에 시공된 다기능 어도의 도면이다. 상부슬래브의 R/C Slab, R/C+S/C Slab 중 R/C+S/C Slab에 적용된 강재는 STS 316으로서 두께는 0.004m이며, 상부슬래브의 구성 재료인 R/C나 R/C+S/C Slab에 시공된 콘크리트 두께가 0.33m일 때의 단면 형상과 다기능 어도 측면 도면을 나타내었다. 여기서 B는 지하이동통로 규격의 가

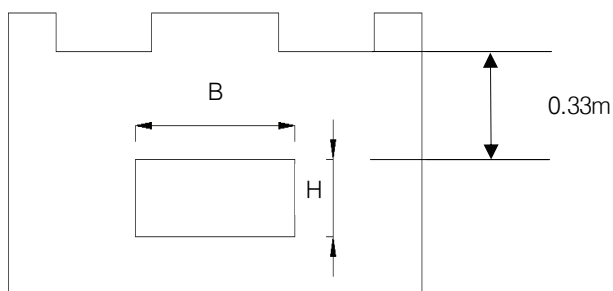


Fig. 1 R/C Slab

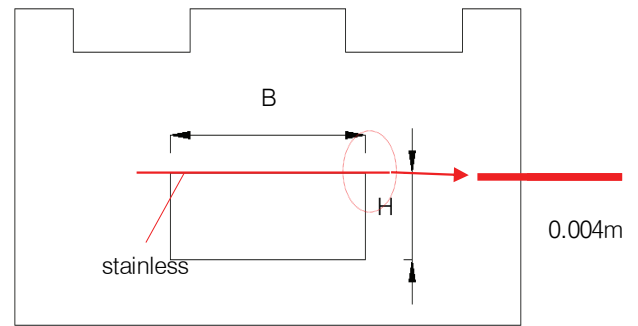


Fig. 2 R/C + S/C Slab

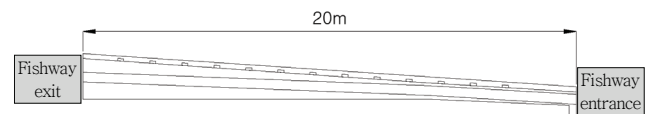


Fig. 3 Side View of Multi-functional Fishway

로이고 H는 세로이다.

2.2 초기하중 및 경계조건

본 논문의 목적은 실제 설계 수압에 대한 구조물설계이고 홍수 시 유속 0.8m/sec, 1.2m/sec, 1.6m/sec를 식 (1)과 같이 수압으로 변환하여 계산하여 적용했다.

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

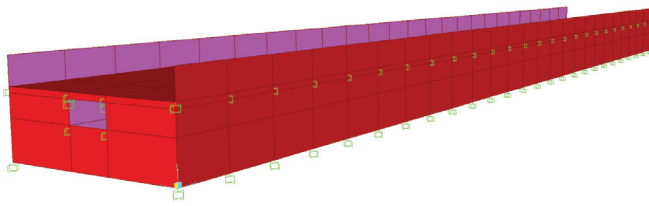
여기서, P는 동압력, ρ 는 밀도, v 는 유속이며, 경계조건으로는 고정조건을 적용하였고, 수압을 받는 면을 지하이동통로에 규격에 따라 Mesh를 분할하는 접촉조건을 부여했다. 어도 구조해석 변수는 Table 1과 같다.

2.3 해석 모델링

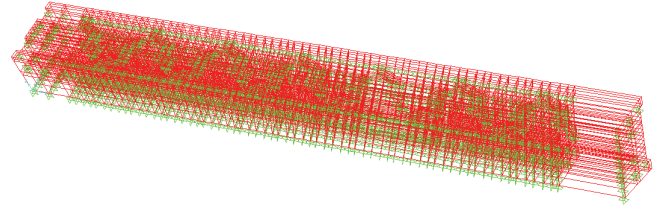
실구조물을 가장 근사적으로 묘사할 수 있는 3차원 모델을

Table 1 The Structure Analysis of Factors

	Fishway Body	R/C Slab, R/C + S/C Slab
Analysis	Size of Underground Passage	1m×0.2m 1m×0.4m 1m×0.6m
	Velocity	0.8m/sec, 1.2m/sec, 1.6m/sec
	Fishway	Upper Slab, Side wall, Maximum Stress of Exit Part, Bending Moment



(a) Multi-Functional Fishway 3D modeling



(b) Multi-Functional Fishway Mesh

Fig. 4 FEM modeling

Table 2 Analysis Conditions

Fiahway	Bonggok River Fishway
Length	20m
Width	2.6m
Width of Wall	0.30m
Size of Underground Passage (B×H)	1m×0.4m
Velocity of flow	1.2m/sec
Strength Design Criteria	fck = 24MPa

Table 3 Analysis Conditions

Fiahway	R/C Slab	R/C+S/C Slab
Length	20m	20m
Width	2.6m	2.6m
Width of Wall	0.30m	0.30m
Size of Underground Passage (B×H)	1m×0.2m 1m×0.4m 1m×0.6m	1m×0.2m 1m×0.4m 1m×0.6m
Strength Design Criteria	fck = 24MPa	fck = 24MPa

사용하였으며 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 적용하여 Shell요소를 사용하여 구조해석을 수행하였다. 대상 구조물의 재료 특성치로 철근과 콘크리트의 탄성계수는 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{MPa}$, $E_c = 2.7 \times 10^4 \text{MPa}$, 포아송비는 0.3을 적용하였다. 그리고 Shell 요소의 Mesh는 자동 분할된 체계를 사용하였다.

다기능 어도의 모델링 형상은 Fig. 4와 같고 봉곡천 다기능 어도의 설계식 규격은 Table 2와 같고 3차원 구조해석 조건은 Table 3과 같다. Fig. 4(a)는 다기능 어도의 핵심기능인 산란을 위해 하천과 바다를 오고 가는 습성을 가진 회귀성 물고기들이 이동하는 시기가 계절적으로 같수기이므로 이때는 물의 양이 부족하므로 지하이동통로의 구비는 필수적이다. 이때의 지하이동통로 출입구의 구조 검토를 위해 모델링한 그림이다. Fig. 4(b)는 다기능 어도가 홍수 때는 상부 슬래브가 유속 변화에 따른 영향을 분석하기 위해 모델링한 그림이다.

Table 4 The Maximum Stress of Exit Part

R/C + S/C Slab (1m × 0.6m, 1.6m/s)	
Maximum Stress	1.564MPa
Allowed Stress	9.6MPa

Table 5 The Bending moment of Exit Part

R/C + S/C Slab (1m × 0.6m, 1.6m/s)	
Bending moment	6.580N·mm

3. 해석 결과

3.1 어도 안정성 해석 결과 및 분석

본 논문에서는 어도의 안정성 검토를 위해 지하이동통로 규격별, 유속별로 Full-Modeling 하여 R/C Slab와 R/C+S/C Slab 형태의 상부 슬래브 (지하이동통로의 천정부가 하부인 어도 상부에 있는 슬래브), 측벽 (어도시설물 상부슬래브의 좌측과 우측의 주벽 (폭 30cm)을 의미), 지하이동통로 출구부 (어도를 기준으로 하천 상류에서 상부슬래브와 하부의 지하이동통로가 시작하는 부분을 의미)의 최대 응력과 휨모멘트를 검토하였다. 해석 결과는 응력과 휨모멘트의 최대값을 대표적으로 Table 4와 5에 나타내었다.

3.1.1 상부 슬래브

본 연구에서는 R/C slab 인 경우에는 steel 보강이 없는 상태이다. 봉곡천 어도는 R/C+S/C Slab 타입으로 상부 슬래브 아래에 4mm 두께의 철판을 보강했다. R/C slab 타입은 거푸집이 필요하여 상부나 하부의 공간 폭이 500mm ~ 950mm로 낮기 때문에 시공이 조잡해지는 단점이 있다.

다기능어도의 구성 재료 변수는 R/C Slab, R/C+S/C Slab 일 때, 각각 유속별로 분류하여 상부 슬래브의 최대응력과 휨모멘트 값 중 가장 큰 값에 대한 구조해석 결과는 다음과 같이 나타났다.

최대응력은 허용응력인 9.6MPa 보다 적은 값을 나타내었고 R/C+S/C Slab가 R/C Slab보다 7%, 휨모멘트의 분석도 R/C+S/C Slab가 R/C Slab보다 14% 적게 나타났다. 이는 RC Slab보다는 R/C+S/C Slab에 0.004m 강판을 바닥에 배치하였기 때문에 응력 증가에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 R/C Slab와 R/C+S/C Slab 공히 유속이 0.8m/s, 1.2m/s, 1.6m/s로 증가 시 최대응력도 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 봉곡천 어도에 시공된 다기능 어도가 안정성 측면에는 신뢰할 수 있는 설계임을 시사하고 있다.

상부 슬래브의 해석결과 봉곡천에 시공된 다기능 어도의 지하이동통로 규격 1m×0.4m, 유속 1.2m/s를 기준으로 유속 1.6m/s, 1m×0.4m일 때 최대응력과 비교한 결과 1m×0.4m, 유속 1.2m/s일 때 R/C Slab에서는 27%, R/C+S/C Slab에서는 24% 적게 나타났고 지하이동통로 규격 1m×0.4m, 유속 1.2m/s를 기준으로 유속 1.6m/s, 1m×0.4m일 때 휨모멘트를 비교한 결과 1m×0.4m, 유속 1.2m/s일 때 R/C Slab에서는 39%, R/C+S/C Slab에서는 41% 적게 나타났다. 최대응력과 휨모멘트가 지하이동통로 규격이 1m×0.6m일 때 보다 1m×0.4m 일 때가 봉곡천 어도가 안정성으로 더 유리한 것으로 판단된다.

3.1.2 측벽

다기능어도의 구성 재료 변수는 R/C Slab, R/C+S/C Slab 일 때, 유속별로 분류하여 측벽의 최대응력과 휨모멘트 값 중 가장 큰 값에 대하여 비교분석하였다. 측벽의 최대 응력은 허용응력인 9.6MPa 보다 적은 값으로 나타났고 R/C+S/C Slab가 R/C Slab 보다 13% 적게 나타났다. 측벽의 휨모멘트는 R/C+S/C Slab가 R/C Slab 보다 35% 정도 적게 나타났다.

측벽의 해석결과 봉곡천에 시공된 다기능 어도의 지하이동통로 규격 1m×0.4m, 유속 1.2m/s 기준으로 최대응력을 비교한 결과 유속 1.6m/s, 1m×0.4m일 때 R/C Slab에서는

22%, R/C+S/C Slab에서는 23% 적게 나타났다. 휨모멘트는 지하이동통로 규격 1m×0.6m, 유속 1.6m/s일 때 R/C Slab에서는 30%, R/C+S/C Slab에서는 31% 적게 나타났다. 측벽의 해석 결과에서 나타냈듯이 휨모멘트의 경우 지하이동통로 규격이 1m×0.6m일 때 보다 1m×0.4m일 때가 봉곡천 어도가 안정성으로 더 유리한 것으로 판단된다.

3.1.3 지하이동통로 출구부

다기능 어도의 핵심은 물고기들이 산란기에도 수량 확보가 가능한 것이므로 봉곡천에도 R/C + S/C slab 타입에 지하이동통로가 구비되어 있기 때문에 봉곡천 설계식과 해석값을 비교한 결과는 안정성을 검토하는데 주요한 지표가 된다.

국내 하천에 대표적인 물고기인 피라미의 유영력은 1.2m/s이지만 중요한 희귀성 물고기인 연어, 은어 등의 유영력이 1.6m/s 이상이다. 다기능 어도는 산란기에 지하이동통로의 수심 유지가 중요한 지표가 되기 때문에 봉곡천 어도의 안정성을 검토하기 위해서 비교 유속을 1.6m/s로 선택한 것은 무리가 없는 것으로 판단된다.

봉곡천에 시공된 다기능 어도의 지하이동통로 규격은 B와 H가 1m와 0.4m 이다. R/C Slab, R/C+S/C Slab일 때, 유속별로 분류하여 지하이동통로 출구부의 최대응력과 휨모멘트를 나타낸 결과는 Table 4, 5와 같다. 지하이동통로 출구부의 최대 응력은 허용 응력인 9.6MPa 보다 적은 값을 나타내었고 R/C Slab 보다 R/C+S/C Slab가 34% 정도 유리한 것으로 나타났다. 지하이동통로 출구부의 휨모멘트는 R/C Slab 보다 R/C+S/C Slab가 평균 37% 정도 유리한 것으로 나타났다.

지하이동통로 출구부의 해석결과 봉곡천에 시공된 다기능 어도의 지하이동통로 규격 1m×0.4m, 유속 1.2m/s 기준으로 유속 1.6m/s, 1m×0.6m일 때와 최대응력을 비교한 결과 1m×0.4m, 유속 1.2m/s일 때 R/C Slab에서는 52%, R/C+S/C Slab에서는 42%로 나타났다.

휨모멘트는 지하이동통로 규격 1m×0.4m, 유속 1.2m/s일 때 보다 유속 1.6m/s, 1m×0.6m일 때 R/C Slab에서는 66%, R/C+S/C Slab에서는 62% 적게 나타났다.

제시한 변수들은 어도의 유영력이 0.8~1.6m/s 이내이므로 연어, 칠성뱀장어 등의 유영력이 보통 0.8~2.0m/s이기 때문에 다기능 어도가 일부 국지성 물고기들이나 희귀성 물고기들의 소상에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 이는 (Watanabe Sigeru, 2012)와 유사한 경향을 보이고 있다.

3.2 R/C Slab형태와 R/C + S/C Slab형태의 응력 분석

Fig. 5는 해석변수 상부 슬래브에 대한 유속과 지하이동통로 규격과 재료별 각각의 최대 응력값을 나타낸 것이다. 지하이동통로 규격별로 비슷한 경향을 보였으며 유속이 1.6m/s 일 때 지하이동통로 규격이 1m×0.4m 보다 1m×0.6m일 경우 R/C Slab의 최대응력이 64%, 지하이동통로 규격이 1m×0.6m 일 경우 R/C+S/C Slab의 최대응력이 55% 적게 나타났다. 분석 결과 R/C Slab, R/C+S/C Slab 1m×0.2m, 1m×0.6m일 때가 봉곡천 어도의 지하이동통로 규격인 1m×0.4m 보다 최대 응력이 유리하므로 봉곡천 어도의 상부 슬래브에 보완이 요구되는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 해석변수 측벽에 대한 유속과 지하이동통로 규격과 재료별 각각의 최대 응력값을 나타낸 것이다. R/C Slab와 R/C+S/C Slab는 유속별로 비슷한 경향을 보였으며 유속이 1.6m/s일 때 지하이동통로 규격이 1m×0.4m 보다 1m×0.6m 일 경우 R/C Slab의 최대응력이 65%, 지하이동통로 규격이 1m×0.6m일 경우 R/C+S/C Slab의 최대응력이 49% 적게 나타났다. 측벽 분석 결과 R/C Slab, R/C+S/C Slab 1m×0.2m, 1m×0.6m일 때가 봉곡천 어도의 지하이동통로 규격인 1m×0.4m 보다 최대 응력이 유리하므로 봉곡천 어도의 측벽에 보완이 요구되는 것으로 판단된다.

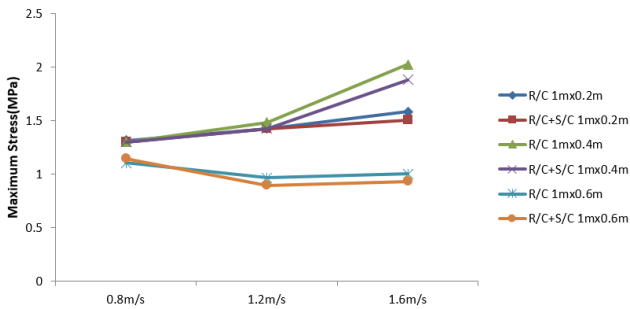


Fig. 5 Comparison of Maximum Stress Analysis between R/C Slab and R/C+S/C Slab by Velocity

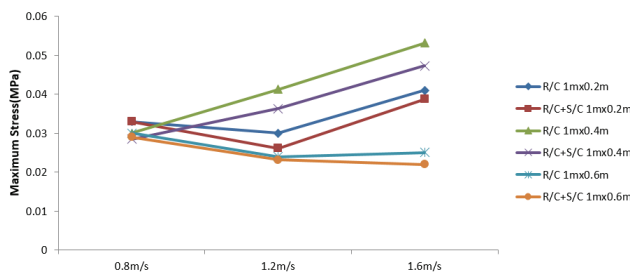


Fig. 6 Comparison of Maximum Stress Analysis between R/C Sidewall and R/C+S/C Sidewall by Velocity

지하이동통로 출구의 규격이 가로가 1m이고 세로 0.2m, 0.4m, 0.6m인데 이는 일반 교량과 같은 내하력이 큰 현장구조물보다는 현저하게 형상이 작은 조건이므로 구조해석의 특성상 이상화 해석에 의한 요인 범주이므로 응력차이가 미미한 것으로 추측될 수 있다. 그러나 국가 하천이나 댐 같은 경우에 어도 설계 시에는 보다 적극적인 현장 조건대로의 각종 수리 모형시험과 병행해서 수리 및 구조전용 S/W에 의한 검토가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 해석변수 지하이동통로 출구부에 대한 유속과 지하이동통로 규격과 재료별 각각의 최대 응력값을 나타낸 것이다. 유속이 1.6m/s일 때 지하이동통로 규격이 1m×0.4m 보다 1m×0.6m일 경우 R/C Slab의 최대응력이 2.5배, 지하이동통로 규격이 1m×0.6m일 경우 R/C+S/C Slab의 최대응력이 1.1배 크게 나타났다. 분석결과 지하이동통로 규격 1m×0.6m 보다 봉곡천 어도의 지하이동통로 규격인 1m×0.4m 가 최대 응력이 유리하므로 봉곡천 어도의 지하이동통로 출구부 안정성이 유리한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 해석변수 상부 슬래브에 대한 유속과 지하이동통로 규격과 재료별 각각의 휨모멘트 값을 나타낸 것이다. 지하이동통로 규격별로 비슷한 경향을 보였으며 유속이 1.6m/s 일 때 지하이동통로 규격이 1m×0.4m 보다 1m×0.2m일 경

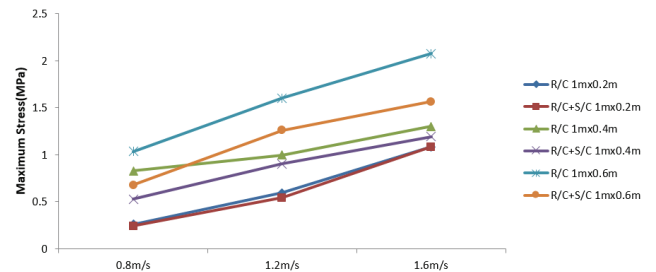


Fig. 7 Comparison of Maximum Stress Analysis between R/C Exit Part and R/C+S/C Exit Part by Velocity

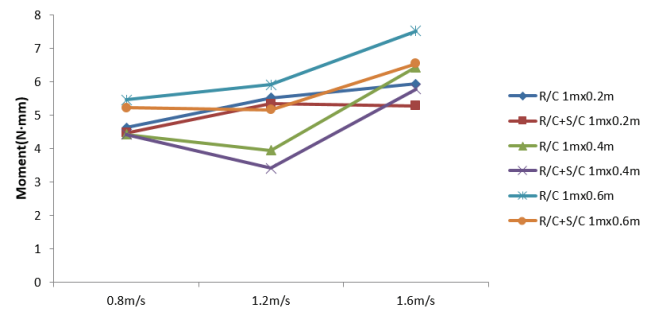


Fig. 8 Comparison of Bending moment Analysis between R/C Slab and R/C+S/C Slab by Velocity

우 R/C Slab의 휨모멘트가 37%, 지하이동통로 규격이 1m×0.2m 일 경우 R/C+S/C Slab의 휨모멘트가 20% 적게 나타났다. 분석 결과 R/C Slab, R/C+S/C Slab 1m×0.2m, 1m×0.6m일 때가 봉곡천 어도의 지하이동통로 규격인 1m×0.4m 보다 휨모멘트가 유리하므로 봉곡천 어도의 상부 슬래브에 보완이 요구되는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 해석변수 측벽에 대한 유속과 지하이동통로 규격과 재료별 각각의 휨모멘트 값을 나타낸 것이다. 유속이 1.6m/s일 때 지하이동통로 규격이 1m×0.4m 보다 1m×0.2m 일 경우 R/C Slab의 휨모멘트가 7% 크게, 지하이동통로 규격이 1m×0.6m일 경우 R/C+S/C Slab의 휨모멘트가 53% 적게 나타났다. 측벽 분석 결과 R/C Slab, R/C+S/C Slab 1m×0.6m 일 때 봉곡천 어도의 지하이동통로 규격인 1m×0.4m 보다 휨모멘트가 크므로 봉곡천 어도의 측벽에 보완이 요구되는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 해석변수 지하이동통로 출구부에 대한 유속과 지하이동통로 규격과 재료별 각각의 휨모멘트 값을 나타낸 것이다. 지하이동통로 규격별로 비슷한 경향을 보였으며 유속이 1.6m/s일 때 지하이동통로 규격이 1m×0.4m 보다 1m×0.6m 일 경우 R/C Slab의 휨모멘트가 4배, 지하이동통로 규격이 1m×0.2m, 1m×0.4m일 경우 R/C+S/C Slab의 휨모멘트가

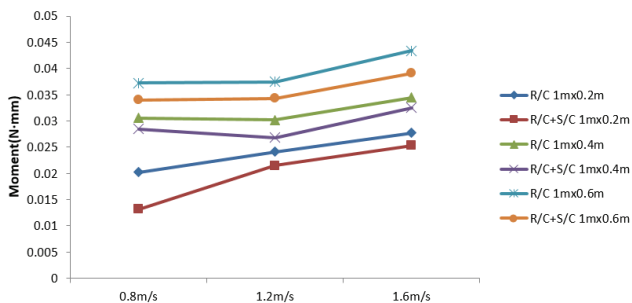


Fig. 9 Comparison of Bending moment Analysis between R/C Sidewall and R/C+S/C Sidewall by Velocity

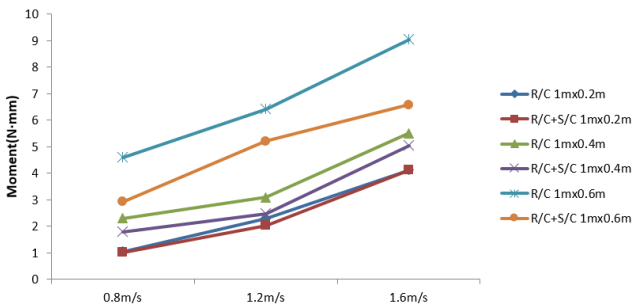


Fig. 10 Comparison of Bending moment Analysis between R/C Exit Part and R/C+S/C Exit Part by Velocity

1.5배 크게 나타났다. 분석결과 지하이동통로 규격 1m×0.6m 보다 봉곡천 어도의 지하이동통로 규격인 1m×0.4m의 휨모멘트가 유리하므로 봉곡천 어도의 지하이동통로 출구부 안정성이 유리한 것으로 판단된다.

봉곡천 어도를 구조 해석한 결과 지하이동통로 규격 1m×0.4m, R/C+S/C Slab를 기준으로 상부 슬래브의 최대응력과 휨모멘트는 각각 55%, 20%, 측벽은 49%, 53% 적게, 지하이동통로 출구부는 1.1배, 1.5배 크게 나타났기 때문에 봉곡천 어도의 보완이 요구되는 것으로 판단된다.

3.3 해석 결과와 설계식과의 비교

3.3.1 봉곡천 다기능어도의 안정성 평가

봉곡천에 적용한 설계식은 어도가 보의 작은 부속시설이므로 그동안 전문적인 S/W에 의한 구조해석 검토가 되지 않은 상태로 관행과 경험적으로 손 또는 Excel으로 계산하여 온 것이 현실이다. 국내 하천에 서식하며 국지적인 회유를 하는 대표적인 어종인 피라미의 유영력이 1.2m/s이므로 이것을 지하이동통로 유속의 지표로 선정하여 해석한 결과를 설계식과 비교 분석하여 Table 6과 같이 나타났다.

본 논문에서는 다기능어도의 안정성 검토를 위해 재료별로 R/C Slab와 R/C + S/C Slab로 구분하였다.

여기서 경북 구미시 봉곡천 어도 건설에 적용된 어도의 상판은 철근콘크리트 슬래브와 슬래브 밑에 강재 (R/C + S/C Slab)이다 (이하 C라 칭함).

상부슬래브 C를 기준으로 S1과 S2를 분석한 결과 S1의 휨모멘트와 최대응력은 각각 10~17%, 7~15%, S2도 각각 10~27%, 4~20% 적게 나타났다.

측벽 C를 기준으로 S1과 S2를 분석한 결과 S1은 휨모멘트와 최대응력이 각각 19~23%, 15~21%, S2도 각각 24~47%, 17~31% 적게 나타났다.

지하이동통로 출구부 C를 기준으로 S1과 S2를 분석한 결과 S1의 휨모멘트와 최대응력은 각각 25~28%, 22~27%, S2도 각각 28~54%, 26~50% 적게 나타났다. S2일 때가 구조 안정성이 확보되는 것으로 판단된다.

3.4 유지관리 방안

기존 건설된 어도들의 대부분 형식은 조립형 블록 어도로 홍수 때 수반되는 모래, 자갈, 나무토막, 비닐 등의 유입물을 차단하는 시설이 없어 어도 기능을 마비시키는 심각한 문제

Table 6 Analysis comparison of stress and Bending moment

Velocity of flow (m/s)	Size of Underground Passage (B×H, m)	Division	C			S1			S2		
			Upper Slab	Side-wall	Exit Part	Upper Slab	Side-wall	Exit Part	Upper Slab	Side-wall	Exit Part
0.8	1×0.2	Bending moment (N·mm)	5.184	0.025	1.386	4.632	0.020	1.035	4.474	0.013	1.004
		Maximum Stress (MPa)	1.444	0.040	0.342	1.314	0.033	0.263	1.300	0.033	0.242
	1×0.4	Bending moment (N·mm)	4.905	0.038	3.081	4.423	0.031	2.301	4.423	0.028	2.301
		Maximum Stress (MPa)	1.416	0.036	1.067	1.299	0.030	0.827	1.299	0.028	0.827
	1×0.6	Bending moment (N·mm)	6.451	0.048	6.351	5.467	0.037	4.602	5.219	0.034	2.915
		Maximum Stress (MPa)	1.192	0.035	1.324	1.104	0.030	1.034	1.143	0.029	0.680
1.2	1×0.2	Bending moment (N·mm)	6.429	0.031	3.155	5.519	0.024	2.286	5.341	0.022	2.028
		Maximum Stress (MPa)	1.638	0.038	0.805	1.424	0.030	0.596	1.423	0.026	0.542
	1×0.4	Bending moment (N·mm)	4.430	0.037	4.133	3.955	0.030	3.084	3.415	0.027	2.479
		Maximum Stress (MPa)	1.632	0.050	1.298	1.483	0.041	0.999	1.423	0.036	0.903
	1×0.6	Bending moment (N·mm)	6.867	0.048	8.872	5.92	0.037	6.420	5.163	0.034	5.214
		Maximum Stress (MPa)	1.115	0.030	2.168	0.966	0.024	1.604	0.896	0.023	1.260
1.6	1×0.2	Bending moment (N·mm)	6.824	0.051	5.688	5.934	0.028	4.122	5.279	0.025	4.122
		Maximum Stress (MPa)	1.835	0.036	1.463	1.582	0.041	1.084	1.504	0.039	1.084
	1×0.4	Bending moment (N·mm)	7.667	0.045	7.667	6.432	0.034	5.508	5.784	0.033	5.038
		Maximum Stress (MPa)	2.340	0.067	1.767	2.024	0.053	1.303	1.880	0.047	1.192
	1×0.6	Bending moment (N·mm)	9.014	0.056	12.647	7.524	0.043	9.047	6.544	0.039	6.580
		Maximum Stress (MPa)	1.170	0.032	2.843	1.000	0.025	2.075	0.931	0.022	1.564

※ C : Bonggok fishway by existing design method (R/C + S/C Slab)

S1 : Analysis by SAP2000 (R/C Slab)

S2 : Analysis by SAP2000 (R/C + S/C Slab)

점은 아예 유지관리 자체가 태생적으로 불가능한 형태이다. 이와 같은 문제점은 국가적인 차원에서 시급히 개선되어야 할 과제이다.

위와 같은 유지관리 방안을 근본적으로 해결하기 위한 대안은 Fig. 11처럼 다기능 어도는 시스템으로 구성되어 있다. Fig. 11은 다기능어도의 평면도로서 상류 어도 출구가 유입물로 봉쇄되는 문제를 방지하는 3단계 유입물 차단시설로 문제점 해결이 가능하다. Fig. 11의 1은 유입물 차단시설로

태풍, 홍수 때 증가된 물의 양과 동시에 유입되는 모래, 자갈, 큰 돌, 나무토막 등 큰 유입물들을 차단시키는 기능이다. 여기에서 모래나 자갈들은 침전시켜 어도 입구의 퇴적을 방지시키는 중요한 역할을 한다. 2는 철재로 구성되어 스크린 형상으로 비닐, 큰 풀 종류, 나뭇가지, 섬유질 쓰레기 등과 물위에 뜨는 조각 등을 거르는 기능을 수행한다. 3은 지하이동통로의 유입물 차단시설이다. 작은 토립자들이 1과 2를 통과했을 경우 어도 입구의 마지막 단계에서 거르는 스크린 형

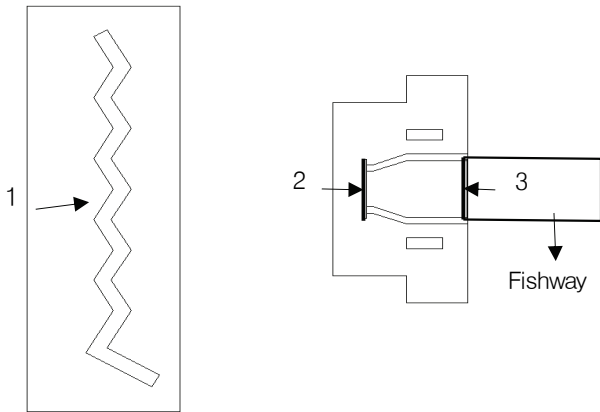


Fig. 11 3 Step Sediment blocking device

태의 차단 시설이다. 이와 같은 시스템은 유지관리가 필요 없으므로 효율성이 높은 특징을 갖고 있다.

또한 이와 같은 유입물 차단시설도 설계 단계에서 3차원 구조해석을 통한 안정성 확보가 시급한 것으로 판단되며 국가적인 차원에서 제도화가 요구되는 것이다.

4. 결론

본 연구는 다기능 어도 안정성을 규명하기 위해 봉곡천 설계식과 해석값으로 비교 검토하여 수행된 결론을 각 부재별로 기술하면 다음과 같다.

- (1) 지하이동통로 출구부 C를 기준으로 S1과 S2를 분석한 결과 S1의 휨모멘트와 최대응력은 각각 25~28%, 22~27%, S2도 28~54%, 26~50% 적기 때문에 27%, 25%의 보완이 요구된다.
- (2) 측벽 C는 S1과 S2를 분석한 결과 S1은 휨모멘트와 최대응력이 각각 19~23%, 15~21%, S2도 24~47%, 17~31% 적게 나타났기 때문에 24%, 15%의 보완이 요구된다.
- (3) 상부슬래브 C는 S1과 S2를 분석한 결과 S1의 휨모멘트와 최대응력은 각각 10~17%, 7~15%, S2도 10~27%, 4~20% 적기 때문에 14%, 10% 보완이 요구되는 것으로 판단된다.
- (4) 지하이동통로 출구부는 봉곡천에 적용한 어도 규격이 국내의 소하천에 가장 유리한 것으로 시사된다.
- (5) 국내의 소하천에 측벽을 설계 할 때 여름철에 빈번하게 발생하는 폭우 시 어도가 물에 잠기는 경우를 대비해 R/C Slab 보다 R/C + S/C Slab가 유지관리나 구조적인 측면에서 안정성이 유리하므로 국내 하천에 적절

한 지하이동통로가 구비된 다기능 어도 설계 단계 시 기초자료로서의 활용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 경북대학교에서 시행한 2010년도 학술 연구비에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. An, M. W. (2008), Development of an Environment Friendly Fish Raceway for Eco-Restoration of Streams, Ph.D. Program in Rural Engineering Graduate School of Konkuk University.
2. Baker, C. O., and Votapka, F. E. (1990), Fish Passage Thorough Culverts, san Dimas, CA: USDA, Forest Service Technology and Development Center, FHWA-FL-90-006: 1-67.
3. Bates, K., Barnard, B., Heiner, B., Klavas, J., and Powers, P. (2003), Design of Road Culverts for Fish Passage, Washington Department of Fish and Wildlife, Olympia.
4. Boubee, J., Jowett, I., Nichols, S., and Williams, E. (1999), Fish Passage at Culverts. Areport for the Department of Conservation, National Institute of Water and Atmospheric Research, Wellington.
5. Byun, W. G. (2011), Development and Application of Enviroment Friendly Hybrid Fishway for River Ecosystem, Dept. of Civil and Environmental System Engineering graduate School of Konkuk University.
6. Cho, S. H. (2013), The Durability Analysis of Multi-Functional Fishway, Graduate School of Science and Technology, Kyungpook National University.
7. Chris Katopodis, P. Eng. (1992), Freshwater Institute, Central and Arctic Region, Canada, R3T 2N6, Introduction to Fishway Design, 4-7, 23-26.
8. Gumi-Si (2010), The project of Restoration for Bonggok river.
9. Gyeongbuk Provice (2013), The project of Flood District Improvement in Cheoksan River, Construction & Disaster Division.
10. Ju, H. K. (2005), A Study on the Feasibility of Fish Way of Large Dam, Graduate School, Yeungnam University.
11. Kim, J. H. (1996), Hydraulic Characteristics by the shape of the partition of Stairs Type Fishway, Korea Water Resources Association Symposium, 29(6), 25-235.
12. Kim, J. H., Kim, C. (1994), Research of Hydraulic Properties for fishway of Stairs type, *Journal of Korea Water and Wastewater Works Association*, 27(2), 63-72.
13. Kim, T. H. (2013), The Stability Analysis of Korean Multi-functional Fishway, Graduate School of Science and Technology, Kyungpook National University.
14. Korea Water Resources Corporation (2004), Korea Environment Institute.
15. Lee, Y. J. (2011), Proposal of New Fishway type for Domestic, *Korean Society of Civil Engineers*, 59(2), 99-110.

-
16. Lee, Y. J. (2013), Proposal of Proper Fishway type on Domestic Environment, Korean Society of Limnology, 27-30.
17. Lee, Y. J., Jang, H. K., Kim, M. G. (2014), Performance Evaluation of Multi-Functional Fishway Suitable for Korea Rivers, *Journal of the Korea Institute or Structural Maintenance Inspection*, 18(1), 1-4.
18. McKinley, W. R. and Webb, R. D. (1956), A proposed correction of migratory fish problems at box culverts, *Fish Res. Papers*, 1(4), 33-45.
19. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (2009), Ecology of eels *Anguilla japonica* and design of eel ladder in the estuaries.
20. Park, S. D. (2001), Assessment of Migratory fish Jumping up by Eco-hydraulic Experiments (I), The ladder-Type of Fishway Korea Water Resources Association Symposium, 34(4), 365-379.
21. Park, S. Y., Kim, S. J., Choi, J. W., Yoon, B. M. (2008), A Study on Hydraulic Characteristics of Culvert Fishway with offset Baffles and Fish Passage Effect, *Korea Water Resources Association*, 41(1), 75-85.
22. Watanabe Sigeru (2012), Japanese Fishway Management Status including Resident Participation, The First Symposium of National Fishway Management, Korea Rural Community Cooperation.
- Received : 10/14/2014
Revised : 10/15/2014
Accepted : 10/22/2014

요 지

본 논문에서는 경북 구미시 봉곡천에 최근 건설된 다기능어도를 대상으로 SAP2000으로 구조 해석하기 위한 변수를 R/C Slab, R/C+S/C Slab 및 지하이동통로 규격(가로×세로)을 1m×0.2m, 1m×0.4m, 1m×0.6m와 유속 0.8m/s, 1.2m/s, 1.6m/s으로 구분하여 해석한 결과와 봉곡천 설계식을 비교하여 안정성을 검토하였다.

봉곡천의 설계식 보다 R/C+S/C Slab 타입이 지하이동통로 출구부는 휨모멘트와 최대응력은 각각 28~54%, 26~50%, 측벽은 24~47%, 17~31%, 상부슬래브인 경우도 10~27%, 4~20% 적게 나타났다. 따라서 최대응력과 휨모멘트가 R/C+S/C Slab 타입이 구조 안정성이 확보되는 것으로 나타났기 때문에 지하통로는 휨모멘트와 최대 응력이 27%, 25%, 측벽은 24%, 15% 상부슬래브는 14%, 10%의 보완이 요구되는 것으로 판단된다.

이러한 결과는 지하이동통로 규격이 봉곡천 규격과 동일한 1m×0.4m일 때가 1m×0.2m, 1m×0.6m 보다 안정성이 가장 유리한 것으로 확인되었다. 또한 해석 및 분석 결과를 근거로 다기능어도 시공 시 기본 자료로 활용이 기대된다.

핵심 용어 : 다기능어도, 봉곡천 설계식, 철근콘크리트 슬래브 (R/C Slab), 철근콘크리트+강판 슬래브 (R/C+S/C Slab), 지하이동통로
