말뚝지지형 조립식 보도 잔교의 상부 및 교각 성능기반설계에 대한 해석연구

A Numerical Study on Performance-Based Design for Pier and Superstructure in Pile Supported Modular Pedestrian Pier

유상량* · 박종섭** · 윤기용***

Yoo, Sang Ryang · Park, Jong Sup · Yoon, Ki Young

Abstract

There are making many pedestrian piers in the West Coast due to the increase of tourism population. The Coastal and Harbor Design Specifications(2005) are used to design domestic pedestrian piers, but the Specifications produce very conservative design for the pedestrian piers because of the heavy design loads. This paper presents the comparisons and evaluations of several domestic and foreign design criteria to determine the design load of the pedestrian piers. Numerical analyses using finite-element program MIDAS were performed to suggest some of performance-based design sections in pile supported modular pedestrian piers(PSMP). Five of analyses parameters and Four of loading conditions were applied to 324 analyses models. Deflections, stresses, and natural frequencies from the analyses results were investigated to evaluate the design sections. Finally, this study suggests the performance-based design sections of the PSMP based on the specifications and the design parameters considered in this paper.

Key words : Modular pier, Pedestrian pier, Pier load, Optimum design, Finite element analysis

요 지

서해 연안역 관광인구 증가로 인해 관광용 보도잔교가 서해안에 널리 설치되고 있다. 국내 관광용 보도잔교의 설계기준은 별도로 존재하지 않으며, 항만 및 어항 설계기준(2005)을 이용하며 검토되고 있다. 이에 따라 국내 연안역 관광용 보도잔교의 설계하중을 결정하기 위해 국내 · 외 설계기준을 비교 · 분석하였다. 또한 조립식 보도잔교 설계의 성능기반 최적설계단면을 제안하기 위하여 범용구조해석프로그램 MIDAS을 이용하여 변수별 수치해석이 실시되었다. 5개의 해석매개변수를 활용하여 총 324개의 모델에 대해 해석을 실시하고, 각 매개변수별 조립식 잔교의 처짐과 응력에 미치는 영향 비교 및 진동에 대한 동적거동을 분석하였다. 본 논문에서는 조립식 보도잔교의 설계 간편성을 극대화하고 안정성을 고려한 설계변수별 최적단면을 제안하였다.

핵심용어 : 조립식 잔교, 보도교, 잔교하중, 최적설계, 유한요소해석

1. 서 론

서해 연안역의 관광인구가 증가하면서 항만시설이 아닌 여가 시설을 위한 바다낚시잔교, 휴양지 등 관광용 보도 잔교가 그림 1과 같이 많이 설치되고 있다.

현재 국내에서는 보도교 설계기준으로 서울특별시가 제정한 시설물 설계 및 시공편람(2001)의 소규모 강교 및 보도육교에 대한 설계기준이 적용되고 있으나, 관광형 보도잔교에 대해서는 별도의 설계규정이 없어 항만 및 어항설계기준(2005)을 준용하여 설계가 이루어지고 있다. 그러나 항만 및

어항설계기준(2005)의 잔교 설계기준은 중차량하중, 적재하중, 선박의 견인력 및 충격력 등을 고려하도록 하고 있어 과도한 설계를 유발하게 된다. 따라서 관광형 보도잔교의 합리적인 설계 및 시공을 위해서는 항만 및 어항 설계기준의 잔교 설계외력의 적용성 분류 및 하중산정이 필요하다. 또한 서해안 등 지역적 특성을 고려한 시공 및 상세설계기준이 마련될 필요가 있다(강효기 등, 2009).

박상길 등(2006)은 최적의 잔교식 안벽 설계가 될 수 있도록 수리모형실험을 실시하여 잔교식 안벽에 대한 반사율, 상부에 작용하는 양압력 및 잔교말뚝에 작용하는 수평압력을

*정회원 · 상명대학교 건설시스템공학과 석사과정 (E-mail : sangs8899@sangmyung.kr)

**정회원 · 상명대학교 건설시스템공학과 교수 (교신저자)

***정회원 · 선문대학교 토목공학과 교수

그림 1. 관광용 보도 잔교

그림 2. 말뚝지지형 조립식 보도잔교 모형

검토하여 잔교식 안벽설계에 기초자료를 제공하였다. 채영수 등(2005)은 계측을 통해 잔교기초말뚝의 변위 및 응력을 시공단계별로 측정하여 잔교 기초말뚝의 안정성 및 활용성을 실험적으로 검토하였다. Buslov와 Scola(1991)는 미국 샌프란시스코 만에 설치되어 있는 목재잔교를 다년간 조사분석하여 잔교 손상정도 평가기법, 구조성능평가 기법 및 보수보강 방안을 제시한 바 있으며, 이 연구내용은 강관 및 복합 잔교기초 조사 및 연구에 널리 사용되고 있다. Zueck과 Blount(2007)는 미국 캘리포니아에 시공된 콘크리트 교각과 강제상부구조로 구성된 환경친화형 조립식 잔교의 설계와 시공의 특징을 발표하였으며, 폭풍시 강한 파도가 작용하는 외해용 조립식 잔교의 경제적인 단면을 제안하고, 해안선에 직각으로 축조되는 돌계식 잔교의 점유면적 최소화로 바다사자 서식지인 잔교설치 해안의 친환경적 조립식 보도 잔교를 시공하였다. 위에 인용된 문헌들은 새로운 조립식 보도 잔교 형식개발에 적극 활용되었다.

현재 국내설계 기준에 보도교를 포함한 교량의 진동에 대한 정량적인 평가기준은 없다. 다만 서울특별시가 제정한 시설물 설계 및 시공편람(2001)의 소규모 강교 및 보도육교편에 고유진동수가 2 Hz내외(1.5~2.3 Hz)에 존재하는 보도교의 경우 보행자에게 불안감과 불쾌감을 유발할 수 있기에 2 Hz 내외의 고유진동수를 가지는 보도교의 설치를 제한하도록 권고하고 있다. 성중수 등(2007)은 보도교 진동기준관련 시설물 설계 및 시공편람(2001)과 영국기준 BS5400, 유럽기준 Eurocode 5(Part 2), 국제표준화기구 ISO 10137기준, 및 스페인 기준 Bro 2004를 비교분석하여, 보도교의 특성과 중요도를 고려하여 해외기준의 적용을 제안하였고 과도한 진동이 발생할 때는 TMD(Tuned Mass Damper)설치를 권장하고 있다.

본 연구에서는 국내 서해 연안역의 특성을 고려하여 관광용 보도 잔교의 설계하중을 결정하고, 새로운 형식의 조립식 관광형 보도잔교의 최적화된 설계단면을 구조해석결과를 토대로 제안하고자 한다. 그림 2는 개발대상 구조물의 모형으로 콘크리트 기초 및 교각, 콘크리트 캡빔(Capbeam), ㄱ형 강거더(Girder), 목재바닥판(Wood Deck)으로 구성되어 있다. 보도 잔교의 설계하중은 항만 및 어항설계기준(2005)을 토대로 검토되었으며, 설계단면의 안전성 검토는 시설물 설계 및 시공편람(서울시, 2001)의 허용응력 및 진동기준을 적용하였다.

본 논문의 구성은 서론, 설계기준에 따른 설계하중 산정과정을 기술하고, 구조해석모델 적용을 위한 모델링 기법과 설계변수를 나타내고 있다. 본 논문에서 설계변수별 해석결과가 자세히 분석되고 있으며, 각 해석조건별 최적화된 설계단면을 최종 제안하고 있다. 설계단면 결정과정에서 발견된 분석내용을 최종 결론에 자세히 수록하고 있다.

2. 설계 하중

항만 및 어항 설계기준(2005)에서는 표 1과 같은 잔교 설계외력을 검토하도록 하고 있으나, 표 1의 설계외력은 일반적인 대형 안벽에서 선박의 접안 및 부두 크레인이 설치되는 잔교의 설계에 적용된다.

관광형 조립식 보도잔교의 경우 적재하중, 열차하중, 자동차하중, 선박관련 하중, 하역기계관련 하중 및 지진력을 고려할 필요가 없다. 파력은 조립식 잔교의 설치 위치에 따라 파랑이 거세게 칠 때를 고려하여 반영한다. 따라서 평상시 파력은 물의 흐름에 의한 수중 또는 수면 부근의 부재 및 구조물에 작용하는 항력으로 검토한다. 본 연구에서는 관광형 보도잔교의 설계외력으로 수직력에 대해서는 상부공 사하중, 균중하중이, 수평력에는 풍하중과 항력이 고려되었다.

2.1 균중하중 산정

본 연구의 관광형 조립식 보도잔교는 수직 활하중인 열차하중 및 자동차 하중은 고려되지 않고 균중하중만 고려된다. 균중하중 적용을 위하여 국내 항만 및 어항설계기준(2005)과 미국의 Design for Piers and Wharves(Unified Facilities

표 1. 잔교 설계외력

수 직 력	수 평 력
· 상부공 사하중	· 활하중에 작용하는 풍하중
· 적재하중	· 선박의 견인력
· 활하중	· 선박의 충격력(방충공의 반력)
· 열차하중	· 주행식 하역기계의 작업하중
· 자동차하중	· 적재하중에 작용하는 지진력
· 균중하중	· 활하중에 작용하는 지진력
· 선박의 견인력	· 파 력(파랑이 거셀 때)
· 양압력	

Criteria, 2005)을 검토하였다. 항만 및 어항설계기준에서는 군중하중은 $5 \text{ kN/m}^2 (0.5 \text{ tf/m}^2)$ 를 표준으로 규정하고 있다. 다만 특수 시설에서는 그 시설의 이용 상황을 고려하여 그 값을 감할 수 있다. 항만 및 어항설계기준에서 제시하는 군중하중의 근거는 군중 특성 즉 보행, 달리기, 급정지 및 뛰어 내림 등의 각종 동작을 고려하여 저면에 발생하는 최대하중을 고려하여 제안한 것이다. Unified Facilities Criteria(UFC)의 Design for Piers and Wharves에서는 보도에 대해서 군중하중은 $100 \text{ lbs/ft}^2 (0.488 \text{ tf/m}^2)$ 로 규정하고 있다. 또한, 최소 보도의 폭은 914 mm 이상으로 규정하고 있다. 군중하중에 대해서 국내외 기준들은 유사한 값을 제안하고 있고 본 연구에서 군중하중은 5 kN/m^2 를 적용한다.

2.2 풍하중 산정

항만 및 어항설계기준(2005)에서는 풍하중 산정시 도로교 설계기준(2005)을 준용하도록 제안하고 있다. 국내외 설계기준(도로교 설계기준, 2005; 건축구조 설계기준, 2005; 가공송 전용 철갑설계기준, 2004; 방음벽 설치기준, 2002; AASHTO Standard, 1994; 일본 도로교시방서, 2005)의 풍하중 산정식을 살펴보면, 설계기준풍속, 고도 및 환경보정계수, 거스트 계수, 항력계수를 포함하고 있으며, 일부 설계기준은 대상구조물의 중요도를 산정식에 반영하고 있다. 다음의 식(1)은 도로교 설계기준에 제시된 풍하중 산정식으로 검토된 설계기준들이 유사한 설계식을 사용하고 있다.

$$p(\text{MPa}) = 5 \times 10^{-7} \rho V_d^2 C_d G \quad (1)$$

여기서 ρ = 공기밀도, V_d = 설계풍속, C_d = 항력계수, G = 거스트 응답계수이다. 국내 서해안연역의 설계조건을 고려하여 $\rho = 0.125 \text{ kgf/s}^2/\text{m}^4$, $V_d = 42.13 \text{ m/s}$, $C_d = 1.6$, $G = 1.9$ 를 적용한다(이병식 등, 2011). 표 2는 산정된 풍압력이 검토된 ㄱ형강의 단위길이당 작용하는 설계풍하중을 나타내고 있다.

2.3 항력 산정

항만 및 어항설계기준(2005), 항만시설물의 안전시설 설계지침(2009), 영국 BS 6349-1(2000)의 Maritime Structures 설계기준을 살펴보면, 항력 산정식은 식(2)와 같이 $1/2 \times (\text{항력}$

계수) $\times (\text{물의밀도}) \times (\text{투영면적}) \times (\text{유속})^2$ 을 사용하고 있다.

$$F_D(\text{kN}) = \frac{1}{2} C_D \rho_0 A U^2 \quad (2)$$

본 연구에서 항력계수(C_D)는 원주일 때 1.0 값을 사용하며, 물의 밀도(ρ_0)는 $10.3 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$, 유속(U)은 국립해양조사원(www.khoa.go.kr)의 통합해양정보에서 최근 10년간 서해안에 발생한 최대 유속인 1.5 m/s 를 사용하였다. 표 3은 본 연구에 검토된 교각지름에 따른 항력 계산값을 나타내고 있다.

3. 유한요소해석 모델링 및 해석 변수

그림 3은 기초 및 교각 일체형 조립식 잔교의 상부구성요소를 나타낸 것으로, 시공단계별로 구성요소를 살펴보면 원형 Pile을 지반에 근입시킨 후 공장에서 제작된 직사각형 Capbeam을 Pile의 두부 횡방향으로 거치시킨 후 ㄱ형강을 종방향으로 거치하는 순서로 이루어진다. 최종적으로 상부에 Wood deck을 설치하여 조립식 잔교가 완성된다. 조립식 잔교의 형식최적화를 위하여 종방향 교각사이(지간 중간)에 가로보 및 브레이싱은 적용하지 않는다.

범용구조해석프로그램 MIDAS(2006)가 변수별 유한요소해석에 적용되었다. 콘크리트 교각, 콘크리트 Capbeam과 ㄱ형강 거더는 보요소(Beam element), Wood Deck은 판요소(Plate element)가 적용되었다. 먼저 연속경간과 다양한 교량폭을 가질 수 있는 연구대상구조물의 특징을 고려하여 표준단면 선정과정을 실시하고, 설계단면 변수별 324개의 모델에 대한 해석을 실시하였다.

3.1 표준해석모델 및 경계조건

보행자를 기준으로 조립식 잔교 상부 바닥판 폭을 결정하기 위하여 서울시 시설물 설계 및 시공편람(2001)의 보도교 폭 규정을 살펴보면, 폭원과 보행자 수와의 관계를 고려해서, 설계 보행자수를 처리할 수 있는 폭원을 규정하고 있다. 원칙으로 1인당 점유폭원은 75 cm 로 기준잡고, 최소 폭원은 1.5 m 로 정의하고 있다. 설계 보행자수는 해당 보도교를 이용한다고 추정되는 1분 동안의 보행자수를 말하지만 이 수치는 통상의 혼잡시의 상황을 대상으로 하고 있으며, 1년에 몇 차례 발생하는 이상의 상황은 고려하지 않는다. 자전거 통행을

표 2. ㄱ형강 거더의 설계풍하중

단면	Type (mm)	설계풍하중 (N/mm)
ㄱ형강	200×200×25	0.66
	300×300×35	0.99
	400×400×35	1.32

표 3. 교각별 설계항력

단면	지름(mm)	설계항력(N/mm)
교각	200	0.23
	300	3.35
	400	0.46

그림 3. 조립식 보도 잔교의 구성

그림 4. 경간별 해석모델

그림 5. 1형강의 경간별 최대처짐

고려할 경우 자전거 1대당 1m의 폭원을 필요로 하며, 휠체어 및 유모차 통행이 많은 경우 0.5 m 폭원을 증가시키기도 한다. 본 조립식 보도 잔교에서는 성인 2명과 유아 1명의 점유폭을 기준으로 하여 잔교의 폭을 2.5m로 결정하였다.

말뚝지지형 보도잔교는 잔교의 전체 길이에 따라 무수히 많은 경간으로 구성되게 된다. 따라서 최적단면 선정에 필요한 변수별 유한요소해석 실시에 앞서서 표준해석경간 결정과 경계조건 결정을 위한 선행 해석을 실시하였다. 그림 4는 경간 결정을 위해 사용된 경간별 유한요소해석모델이다. 해석모델의 단위지간은 5 m, 원형교각길이 5 m, 원형교각지름 200 mm, Wood Deck 두께는 50 mm를 적용하였으며 교각 하부는 고정지점, 1형강과 Wood Deck 양단은 로울러 경계조건(종방향: 구속, 횡방향:자유)을 적용하였다. 해석단면 물성치는 1형강 탄성계수는 210 GPa, Wood Deck 탄성계수는 10.3 GPa, 콘크리트 교각 탄성계수는 21.7 GPa이다.

그림 5~7은 경간별 1형강의 최대처짐 및 최대응력, Wood Deck의 최대처짐을 나타내고 있다. 그림의 L2W5모델은 1형강 200×200×25mm, Wood Deck 두께 5 cm을 나타내며, L4W20 모델은 1형강 400×400×35 mm, Wood Deck 두께 20 cm을 나타낸다. 그림 5를 살펴보면 1형강의 최대수직처

그림 6. 1형강의 경간별 최대응력

그림 7. Wood Deck의 경간별 최대처짐

그림 8. 해석모델 경계조건

짐은 1경간과 2경간의 값들은 크게 변화가 생기고 3경간부터 4경간, 5경간에서는 일정한 값을 보이는 것을 알 수 있다. 1형강의 최대응력과 Wood Deck의 최대수직처짐 또한 3경간부터 4경간, 5경간 일정한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 5~7의 경간별 해석모델 결과를 토대로 3경간 연속 모델을 변수별 해석표준모델로 선정하였다.

본 연구대상구조물은 기초와 교각 일체형 조립식 잔교로서 본 논문에서는 교각에 해당되는 Pile 상부와 상부구조의 최적 단면산정을 목적으로 하고 있다. 따라서 그림 8과 같이 교각 하부는 고정지점으로 단순화하여 적용하였으며, 1형강과 Wood Deck은 강절연결조건을 적용하여 1형강과 Wood Deck이 일체거동하도록 모델링하였다. 또한, 1형강과 Wood Deck 종방향 양단은 로울러 경계조건을 적용하였다.

3.2 재하하중 및 해석변수

해석에 사용된 지중, 균중하중, 풍하중, 항력은 그림 9와 같이 모델에 수직 및 수평으로 재하하였다. 최적단면 선정에

그림 9. 하중 재하 방법

표 4. 유한요소해석변수

해석 변수	ㄱ형강 (mm)	Wood Deck 두께 (mm)	교각		지간 (m)
			지름 (mm)	길이 (mm)	
종류	200×200×25	50	200	1	5
	300×300×35	120	300	3	7
	400×400×35	200	400	5	10

그림 10. 해석변수별 모델명

위한 해석변수로는 형강의 종류, Wood Deck 두께, 교각의 지름과 길이, 지간이 고려되었다. 자세한 해석변수는 표 4에 나타내었다. ㄱ형강 3종류, Wood Deck 두께 3종류, 교각지름 3종류, 교각 길이 4종류, 지간 3종류를 적용하였으며 총 324개의 해석모델이 그림 10과 같이 정의되었다.

4. 설계단면별 유한요소해석결과

4.1 형강 크기 영향

표 5는 교각 지름 200 mm와 3가지 형강종류에 대해 교각 길이와 지간의 길이를 해석변수로 적용하여 ㄱ형강에서 발생하는 최대발생 처짐결과를 나타내고 있으며, 최대처짐은 지간 중앙에서 발생하였다. 표 5에 나타난 바와 같이 지간 10 m, Wood Deck두께 50 mm, 교각길이 1 m일 때, 사용하는 ㄱ형강을 200×200×25에서 300×300×35로 증가시킬 경우 ㄱ형강에서 발생하는 최대처짐은 평균적으로 31% 감소하였고, 300×300×35에서 400×400×35로 증가시킬 때 평균적으로

표 5. ㄱ형강 최대 수직처짐(mm)

교각 길이 (m)	지간 (m)	해석모델								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	2.0	1.7	1.2	0.6	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3
	7	7.3	6.2	4.1	2.2	2.1	1.9	1.0	1.0	1.0
	10	28.4	24.0	15.9	8.7	8.4	7.3	4.1	4.1	3.8
3	5	2.5	2.1	1.4	0.7	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3
	7	9.2	7.8	5.0	2.5	2.4	2.1	1.1	1.1	1.1
	10	36.2	30.8	19.9	10.2	9.8	8.5	4.5	4.5	4.2
5	5	2.8	2.3	1.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.3
	7	10.2	8.6	5.4	2.7	2.6	2.2	1.2	1.2	1.1
	10	40.5	34.2	21.6	10.8	10.3	8.9	4.7	4.6	4.3
7	5	2.9	2.5	1.6	0.8	0.7	0.7	0.3	0.4	0.4
	7	10.8	9.1	5.7	2.8	2.7	2.3	1.2	1.2	1.6
	10	43.2	36.3	22.6	11.1	10.6	9.1	4.8	4.7	4.4

그림 11. 교각길이 5 m일 때 ㄱ형강의 최대처짐

43%가 감소되었다. 또한, 지간을 5 m에서 7 m로 증가시킨 경우 사용된 형강종류와 상관없이 수직처짐은 3.7배 증가하였으며, 7 m에서 9 m로 증가시킨 경우 3.9배 최대처짐이 증가하였다.

그림 11은 서울특별시 시설물 설계 및 시공편람(소규모 강교 및 보도육교)에서 제안하고 있는 허용처짐 조건 L(지간길이)/400의 결과와 해석결과를 나타내고 있다. 실선은 허용처짐을 나타내며 점들은 해석을 통해 얻어진 결과들이다. 실선보다 위쪽에 놓이는 부재는 허용처짐을 넘는 경우로 그림에 나타난 바와 같이 작은 크기의 형강(L2)과 작은 Wood Deck 두께(W5)이 사용된 경우 허용처짐을 넘는 수직처짐이 발생하였다.

표 6과 그림 12는 ㄱ형강에서 발생하는 최대응력을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 교각의 길이는 ㄱ형강에 발생하는 응력에 큰 영향을 미치지 못하며, 지간이 증가됨에 따라 일정한 비율로 ㄱ형강에 발생하는 응력이 증가되는 것을 알 수 있다. Wood Deck의 두께는 50 mm, 지간은 5 m, 7 m, 10 m인 경우, 200×200×25단면에서 300×300×35단면으로 증가시킬 경우 발생한 응력이 평균적으로 33%는 감소되었으며, 300×300×35에서 400×400×35단면으로 증가시킬 때 평균적으로 54%가 감소하였다.

그림 12는 발생하는 최대응력과 도로교 설계기준(2005)에

표 6. ㄱ형강 최대발생 응력(MPa)

교각 길이 (m)	지간 (m)	해석 모델								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	45	37	25	16	14	13	9	8	8
	7	95	79	50	33	31	27	18	17	16
	10	202	166	103	69	65	56	39	37	35
3	5	47	39	27	16	14	13	9	8	8
	7	99	82	53	33	31	27	18	17	17
	10	211	173	107	70	66	57	39	37	35
5	5	47	39	27	16	14	13	9	8	8
	7	100	83	53	33	31	27	18	17	17
	10	214	175	108	70	66	57	38	37	35
7	5	47	39	27	16	14	13	8	8	8
	7	100	83	53	33	31	27	18	17	17
	10	215	176	108	70	66	57	38	37	35

그림 12. 교각길이 5 m일 때 ㄱ형강의 최대응력

표 7. 형강과 Wood Deck 두께별 설계단면

교각 길이 (m)	지간 (m)	ㄱ형강과 Wood Deck 두께								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	×	O	O	O	O	O	O	O	O
3	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	×	×	O	O	O	O	O	O	O
5	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	×	×	O	O	O	O	O	O	O
7	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	×	×	O	O	O	O	O	O	O

서 제안하고 있는 SM400 강재의 허용응력 140 MPa과 비교한 결과를 나타내고 있다. 실선으로 표시된 것이 허용응력값이다. 그림을 살펴보면 L2W5, L2W12의 경우 허용응력보다 큰 응력이 발생됨을 알 수 있다.

표 7은 3가지 형강종류에 대해 교각 길이와 지간의 길이를 설계변수로 적용한 경우 허용처짐과 허용응력과 비교하여 설

계에 적용가능한 단면의 형식을 나타내고 있다. 검토된 단면 형식은 거의 대부분은 허용응력과 허용처짐값 보다 작은 값을 나타내고 있으며 L2W5 단면이 10 m경간에 사용되는 경우 허용값을 초과하는 것으로 분석되었다.

4.2 교각 지름의 영향

조립식 잔교의 횡방향 변위를 일으키는 주요하중으로 ㄱ형강 거더에 작용하는 풍하중과 교각에 작용하는 항력이 있다. ㄱ형강에 작용하는 풍하중은 교각에 작용하는 항력에 비해 매우 작은 변위를 일으키며 교각의 횡변위는 원형 교각의 크기 즉 지름에 영향을 받게 된다. 항력은 고정단에서 교각 3 m 높이까지 가력되었으며, 교각 길이 1 m인 경우 항력을 가력하지 않았다(바다물이 없는 곳에 위치하는 잔교). 표 8과 그림 13은 Wood Deck의 두께가 50 mm인 경우 교각 길이와 지름, 지간 및 ㄱ형강의 크기에 변화를 주면서 교각 지름이 잔교 횡변위에 미치는 정량적인 영향을 분석하였다.

해석결과 교각의 최대 횡변위는 교각과 ㄱ형강이 연결되는 부분에서 발생되며, ㄱ형강의 단면이 증가되면 ㄱ형강에 작용하는 풍하중 단면이 증가하므로 횡방향 변위가 일부 증가되나 그 영향은 1.3% 내외였다. 그러나 교각지름의 변화에 따른 횡방향 변위는 큰 영향을 받고 있다. 교각의 지름은 같고 교각의 길이를 3 m에서 5 m로 증가시킨 경우 잔교의 횡방향 변위는 평균 4.1배가 증가되었으며, 교각의 길이를 5 m에서

표 8. 교각 횡방향변위(mm)

교각 길이 (m)	지간 (m)	해석 모델								
		L2 D20	L2 D30	L2 D40	L3 D20	L3 D30	L3 D40	L4 D20	L4 D30	L4 D40
1	5	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0
	7	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0
	10	0.2	0.1	0.0	0.3	0.1	0.0	0.3	0.1	0.1
3	5	2.2	0.6	0.3	3.1	0.8	0.3	4.0	1.0	0.4
	7	2.9	0.7	0.3	4.1	1.0	0.5	5.3	1.3	0.6
	10	4.0	1.0	0.4	5.7	1.4	0.6	7.4	1.8	0.8
5	5	8.9	2.1	0.8	12.8	2.9	1.2	16.7	3.8	1.5
	7	12.1	2.8	1.1	17.5	4.0	1.6	23.0	5.2	2.1
	10	16.8	3.8	1.5	24.6	5.5	2.2	32.4	7.3	2.9
7	5	22.9	5.0	1.9	33.5	7.2	2.7	44.1	9.5	3.5
	7	31.5	6.9	2.6	46.4	10.1	3.8	61.3	13.3	5.0
	10	44.3	9.7	3.7	65.6	14.2	5.4	86.8	18.8	7.1

그림 13. 교각길이 5 m일때 교각의 횡방향변위

표 9. 교각의 최대모멘트(kN · m)

교각 길이 (m)	지간 (m)	해석모델								
		L2 D20	L2 D30	L2 D40	L3 D20	L3 D30	L3 D40	L4 D20	L4 D30	L4 D40
1	5	0.6	1.5	2.2	0.7	1.9	2.8	0.8	1.9	3.0
	7	0.6	1.5	2.3	0.9	2.1	3.3	0.9	2.3	3.7
	10	0.5	1.3	2.1	0.9	2.3	3.6	1.0	2.6	4.2
3	5	1.4	1.3	1.4	2.0	1.8	2.0	2.6	2.5	2.7
	7	1.9	1.9	2.1	2.7	2.5	3.8	3.6	3.4	3.9
	10	2.8	2.9	3.5	3.9	3.9	4.4	5.1	5.1	5.9
5	5	2.8	2.6	2.6	4.0	3.8	3.7	5.3	5.1	5.1
	7	3.8	3.7	3.8	5.5	5.3	5.3	7.2	7.0	7.2
	10	5.4	5.5	5.9	7.8	7.7	8.0	10.2	10.2	10.7
7	5	4.2	4.3	4.3	6.1	6.1	6.1	8.0	8.1	8.2
	7	5.7	5.6	5.7	8.2	8.1	8.0	10.8	10.7	10.8
	10	8.0	8.1	8.5	11.6	11.6	11.8	15.3	15.3	15.8

그림 14. 교각길이 5m일 때 교각의 최대모멘트

표 10. 형강과 교각지름별 사용가능단면

교각 길이 (m)	지간 (m)	I형강과 교각 지름								
		L2 D20	L2 D30	L2 D40	L3 D20	L3 D30	L3 D40	L4 D20	L4 D30	L4 D40
1	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O
3	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	×	O	O
5	5	O	O	O	O	O	O	×	O	O
	7	O	O	O	×	O	O	×	O	O
	10	×	O	O	×	O	O	×	O	O
7	5	O	O	O	×	O	O	×	O	O
	7	×	O	O	×	O	O	×	O	O
	10	×	O	O	×	O	O	×	O	O

7m로 증가시킨 경우 잔교의 횡방향 변위는 평균 2.6배가 증가되었다. 교각의 최대 횡방향 변위가 일어나는 단면은 L4W5D20S10로 최대 86.8 mm가 발생되었다.

표 9는 교각에서 발생하는 최대모멘트값을 나타내고 있으며, 그림 14는 도로교 설계기준(2005)의 최저설계기준강도 18 MPa를 사용하여 교각지름이 200 mm일 때 허용모멘트값

4.48 kN-m과 발생하는 최대모멘트를 비교하고 있다.

교각에 발생하는 모멘트는 횡변위 경우와 마찬가지로 교각의 단면에 따라 큰 영향을 받는다. 표 9를 살펴보면 교각의 단면이 증가하면 모멘트 저항값은 증가되나 항력이 작용하는 투영면적이 증가되어, 결국 교각 단면증가에 따라 모멘트가 증가되는 것으로 나타났다. Wood Deck 두께 50 mm에 대해 교각 지름이 200 mm에서 300 mm로 증가시킨 경우 평균 2.5배 모멘트가 증가되었으며, 교각 지름이 300 mm에서 400 mm로 증가시킨 경우 평균 1.5배 모멘트가 증가되었다.

표 10은 3가지 형강종류에 대해 교각 길이와 지간의 길이를 설계변수로 적용하여 원형 교각의 지름을 200 mm, 300 mm, 400 mm로 변경할 경우, 횡방향 최대처짐과 허용모멘트 값을 비교분석하여 사용가능한 설계단면을 제안한 것이다. 검토된 108개의 설계단면 중에서 15개의 단면이 허용값을 넘는 결과를 나타내었고 나머지 93개의 단면은 안전하게 사용이 가능한 것으로 분석되었다.

4.3 Wood Deck 두께의 영향

Wood Deck은 상부구조물의 균중하중을 직접 재하되는 부재이며, I형강 거더와 Wood Deck으로 바닥판이 구성된다. Wood Deck의 두께에 따라 발생하는 응력 및 처짐에 큰 영향을 미치며, 해석결과 Wood Deck의 최대수직처짐과 최대응력은 지간과 폭의 중앙에서 발생되었다.

표 11. Wood Deck의 최대 수직처짐(mm)

교각 길이 (m)	지간 (m)	해석모델								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	13.2	2.6	1.3	8.6	1.6	0.7	7.6	1.38	0.5
	7	22.9	7.3	4.0	13.5	3.4	2.1	11.2	2.3	1.3
	10	47.3	25.2	15.9	23.7	9.7	7.58	17.9	5.5	4.1
3	5	13.8	3.1	1.6	8.8	1.7	0.9	7.8	1.4	0.6
	7	24.9	9.0	5.3	13.9	3.8	2.4	11.4	2.5	1.4
	10	54.8	31.7	19.8	25.2	11.2	8.7	18.4	6.0	4.5
5	5	14.1	3.3	1.7	8.9	1.8	0.9	7.8	1.4	0.7
	7	25.9	9.8	5.7	14.0	3.9	2.6	11.5	2.6	1.5
	10	59.1	35.1	21.5	25.8	11.7	9.1	18.6	6.2	4.7
7	5	14.3	3.5	1.8	8.9	1.9	1.0	7.9	1.5	0.7
	7	26.6	10.3	5.9	14.2	4.1	2.7	11.6	2.7	1.6
	10	61.8	37.1	22.5	26.2	12.1	9.4	18.8	6.3	4.9

그림 15. 교각길이 5m일 때 Wood Deck의 수직처짐

표 12. Wood Deck의 최대응력(MPa)

교각 길이 (m)	지간 (m)	해석모델								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	4.4	1.4	0.9	3.7	1.0	0.6	3.5	0.9	0.5
	7	6.2	2.2	1.6	5.0	1.2	0.8	4.8	1.2	0.6
	10	7.5	3.9	3.3	6.4	1.7	1.5	6.1	1.4	0.9
3	5	4.4	1.4	0.9	3.7	1.0	0.6	3.5	0.9	0.5
	7	6.2	2.2	1.7	5.1	1.2	0.9	4.8	1.2	0.6
	10	7.5	4.0	3.4	6.4	1.7	1.5	6.1	1.4	0.9
5	5	4.4	1.4	0.9	3.7	1.0	0.6	3.6	0.9	0.5
	7	6.2	2.2	1.7	5.1	1.2	0.9	4.8	1.2	0.6
	10	7.5	4.1	3.4	6.4	1.7	1.5	6.1	1.4	0.9
7	5	4.4	1.4	0.9	3.7	1.0	0.6	3.6	0.9	0.5
	7	6.2	2.2	1.7	5.1	1.2	0.9	4.8	1.2	0.6
	10	7.5	4.1	6.4	6.4	1.7	1.5	6.1	1.4	0.9

그림 16. 교각길이 5m일 때 Wood Deck의 최대응력

표 11과 그림 15는 교각 지름 200 mm와 3가지 형강종류에 대해 교각 길이와 지간의 길이 및 Wood Deck의 두께를 해석변수로 적용하여 Wood Deck에 발생하는 최대수직처짐을 나타내고 있다. 그림 15는 서울특별시 시설물 설계 및 시공편람(소규모 강교 및 보도육교)에서 제안하고 있는 허용처짐 조건 $L(\text{지간길이})/400$ 의 결과와 해석결과를 비교하고 있다. 실선은 허용처짐을 나타내며 점들은 해석을 통해 얻어진 결과들이다. 실선보다 위쪽에 놓이는 부재는 허용처짐을 넘는 경우로 그림에 나타난 바와 같이 L2W5, L2W12 단면이 허용처짐을 넘는 수직처짐이 발생하였다. 지간이 5 m이고 교각 길이가 3 m, 5 m, 7 m 일 때 Wood Deck의 두께를 50 mm에서 120 mm로 증가시키면 Wood Deck에서 발생하는 최대처짐이 평균 22.6% 감소하는 것을 알 수 있었으며, Wood Deck의 두께를 120 mm에서 200 mm로 증가시키면 발생하는 최대처짐이 평균 51.9% 감소하였다.

표 12와 그림 16은 Wood Deck에 발생하는 최대응력을 나타낸 것이다. 건축구조설계기준(2005)에서 탄성계수 10.5 GPa인 침엽수 낙엽송류 2등급에서의 허용응력은 6 MPa로 제안하고 있다. 그림 16은 발생된 최대응력과 허용응력을 비교하는 그림으로 실선은 허용응력을 나타내며, 점들은 해석 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 L2W5 단면이 지간 7 m와 10 m에 사용된 경우 허용응력값을 넘는 값이 발생하였으며, L2W12 단면이 지간 10 m에 사용된 경우에도 허용응력

표 13. 형강과 Wood Deck 두께별 사용가능단면

교각 길이 (m)	지간 (m)	I형강과 Wood Deck 두께								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	×	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	×	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	×	×	O	×	O	O	×	O	O
3	5	×	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	×	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	×	×	O	×	O	O	×	O	O
5	5	×	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	×	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	×	×	O	×	O	O	×	O	O
7	5	×	O	O	O	O	O	O	O	O
	7	×	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	×	×	O	×	O	O	×	O	O

값을 넘는 결과를 나타내었다.

표 13은 3가지 형강종류에 대해 교각 길이와 지간의 길이 및 Wood Deck의 두께를 해석변수로 적용하여 Wood Deck의 두께를 50 mm, 120 mm, 200 mm으로 변경할 경우, 최대수직처짐과 허용응력을 비교분석하여 사용가능한 설계단면을 제안한 것이다. 검토된 108개의 설계단면 중에서 24개의 단면이 허용값을 넘는 결과를 나타내었고, 나머지 84개의 단면은 안전하게 사용이 가능한 것으로 분석되었다. L2W5 단면은 검토결과 적용이 불가능하며, L2W20은 모든 경우에 적용가능하였다. 지간이 10 m인 경우 검토된 36개의 모델 중 20개의 모델이 적용가능하고, 지간이 5 m와 7 m인 경우 검토된 대부분의 단면은 적용 가능한 것으로 분석되었다.

4.4 고유진동해석

표 14와 그림 17은 교각 길이 1 m, 3 m, 5 m, 7 m, 교각 지름 200 mm, 300 mm, 400 mm, 지간 5 m, 7 m, 10 m, I형강 200×200×25, Wood Deck 50 mm를 사용한 경우의

표 14. 고유진동수(Hz)

교각 길이 (m)	지간 (m)	I형강과 Wood Deck 두께		
		D20	D30	D40
1	5	26.6	33.9	37.5
	7	14.5	18.3	20.0
	10	6.6	9.5	10.1
3	5	5.3	10.3	14.9
	7	4.9	9.6	14.0
	10	4.4	8.4	9.6
5	5	2.4	4.6	6.6
	7	2.2	4.3	6.3
	10	2.0	4.0	5.9
7	5	1.4	2.6	3.8
	7	1.3	2.5	3.6
	10	1.2	2.3	3.4

그림 17. 고유진동수 해석결과

그림 18. 고유진동모드

1차 고유진동수를 나타내고 있다. 그림 17은 고유진동수 해석결과와 서울특별시 시설물 설계 및 시공편람(2001)에서 정의하고 있는 2 Hz내외의 범위를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 검토된 36개의 모델에서 1.5~2.3 Hz 범위에 존재하는 경우는 L2W20D20S7과 L2W20D20S10 두 가지 경우이다. 그림 18은 고유진동모드 1차에서 4차까지의 모드를 나타낸 것으로 1차모드는 잔교의 횡방향 진동이다.

4.5 설계제안단면

표 15~17은 앞에서 검토된 ㄱ형강 종류, 교각 길이 및 지름, Wood Deck 두께, 및 고유진동수를 고려한 검토단면들의 적용가능성을 교각 지름을 기준으로 나타낸 것이다. 표 15는 교각 지름 200 mm일 때 ㄱ형강, 교각 길이, 지간, Wood Deck 두께를 고려한 것으로 모든 지간에 있어서 L2W5는 적용할 수 없으며, 지간이 10m인 경우 36개의 검토단면 중 11개 단면이 적용 가능하다.

표 18은 지간 길이 5 m, 7 m, 10 m와 교각길이 1 m, 3 m, 5 m, 7 m를 고려한 경우의 경제적인 설계 제안단면을 나타내고 있다. 표에 언급된 단면은 최소단면으로 표에 나타난 단면보다 큰 경우의 단면은 안전측으로 설계에 사용이 가능하다.

표 15. 교각지름 200 mm일 때 사용가능단면

교각 길이 (m)	지간 (m)	단면								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	○	○
3	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	×	×
5	5	×	○	○	×	×	×	×	×	×
	7	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	10	×	×	×	×	×	×	×	×	×
7	5	×	○	○	×	×	×	×	×	×
	7	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	10	×	×	×	×	×	×	×	×	×

표 16. 교각지름 300 mm일 때 사용가능단면

교각 길이 (m)	지간 (m)	단면								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	○	○
3	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	○	○
5	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	○	○
7	5	×	○	○	×	○	○	×	×	×
	7	×	○	○	×	×	×	×	×	×
	10	×	×	○	×	×	×	×	×	×

표 17. 교각지름 400 mm일 때 사용가능단면

교각 길이 (m)	지간 (m)	단면								
		L2 W5	L2 W12	L2 W20	L3 W5	L3 W12	L3 W20	L4 W5	L4 W12	L4 W20
1	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	○	○
3	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	○	○
5	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	○	○
7	5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	7	×	○	○	○	○	○	○	○	○
	10	×	×	○	×	○	○	×	○	○

표 18. 시간과 교각 길이별 설계 제안 단면

시간(m) 교각 길이 (m)	5	7	10
1	L2W12D20 L2W20D20 L3W5D20 L3W12D20	L2W12D20 L2W20D20 L3W5D20 L3W12D20	L2W20D20 L3W12D20 L3W20D20 L2W20D30
3	L2W12D20 L2W20D20 L3W5D20 L3W12D20	L2W12D20 L2W20D20 L3W5D20 L3W12D20	L2W20D20 L3W12D20 L3W20D20 L2W20D30
5	L2W12D20 L2W20D20 L2W12D30 L2W20D30	L2W12D30 L2W20D30 L3W5D30	L2W20D30 L3W12D30 L3W20D30
7	L2W12D20 L2W20D20 L2W12D30 L2W20D30	L2W12D30 L2W20D30 L2W12D40 L3W5D40	L2W20D30 L2W20D40 L3W12D40

5. 결 론

본 연구에서는 5~10 m의 시간, 1~7 m의 교각길이를 가지는 조립식 보도잔교에 대하여 ㄱ형강, Wood Deck 두께, 교각 두께를 변화시키면서 최적화된 설계단면선정을 위한 연구를 수행하였다. 연구결과를 통해 해석변수별 최적 단면을 본문에 기술하였고, 중요결과를 간략히 기술하면 다음과 같다.

- 1) 조립식 보도잔교에서 최대 수직처짐에 대해 영향을 미치는 중요 요인은 Wood Deck 두께, ㄱ형강 크기, 시간이 다. 수직처짐에 미치는 영향 정도를 살펴보면 시간 > Wood Deck 두께 > ㄱ형강 크기이다. ㄱ형강은 바닥판에서 차지하는 비율이 상대적으로 Wood Deck보다 매우 적어 형강의 탄성계수는 Wood Deck보다 큰 값을 가지나 단면의 크기가 처짐에 보다 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다.
- 2) 연구대상구조물의 상부구조물 형식을 살펴보면 ㄱ형강 거더는 상부 바닥판 횡방향 끝단에만 설치가 되며, 종방향 경간사이에 추가적인 종방향 스트링거(stinger)나 횡방향 브레이싱(가로보 또는 x-bracing)이 설치되지 않는 최적화된 구조이다. 따라서 균중하중 등 수직하중에 대해서 Wood Deck 횡방향(폭 2.5 m) 중앙부분에서 최대 처짐이 발생되며, 최대처짐 및 최대발생응력이 허용값을 넘지 않는 설계단면에 있어서는 부부재(stringer 및 bracing)를 설치할 필요가 없다
- 3) 시간 5 m, 교각길이 5 m인 경우 ㄱ형강 200×200×25 (L2), Wood Deck 두께 120 mm, 교각 지름 200 mm를 가지는 L2W12D20P5S5단면이 최적단면이다. 이 단면은 서울시 시설물 설계 및 시공 편람(2001)에서 제안하고 있는 허용처짐에 대해 ㄱ형강의 경우 18.7% 정도 값을 나타내었으며, Wood Deck의 처짐은 26.56%, ㄱ형강의 응력은 도로교 설계기준(2005)의 허용응력에

27.93%가 발생되었고, Wood Deck 응력은 건축물 설계 기준(2005)의 허용응력에 23%, 교각의 모멘트는 63.84% 정도의 값이 발생되었다.

- 4) 시간 7 m, 교각길이 5 m인 경우 ㄱ형강 200×200×25, Wood Deck 두께 120 mm, 교각 지름 300 mm인 L2W12D30P5S7단면이 최적단면이다. 이 단면은 서울시 시설물 설계 및 시공 편람(2001)에서 제안하고 있는 허용처짐에 대해 ㄱ형강의 경우 35% 정도 값을 나타내었으며, Wood Deck의 처짐은 42%, ㄱ형강의 응력은 도로교 설계기준(2005)의 허용응력에 56%가 발생되었고, Wood Deck 응력은 건축물 설계기준(2005)의 허용응력에 36%, 교각의 모멘트는 24.08% 정도의 값이 발생되었다.

본 연구는 Wood Deck과 ㄱ형강 거더가 서로 일체거동을 할 수 있는 연결조건을 가지는 경우를 고려하였으며, 교각하부는 고정단으로 고려하였다. 후속연구로 Wood Deck과 ㄱ형강의 연결조건, 기초지반조건 및 상세연결방법을 고려한 시공비 비교연구가 추가적으로 진행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원이 시행하는 지역기술혁신사업 (09지역기술혁신 B-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 강효기, 박종섭, 김대규, 윤기용 (2009) 연안 및 다양한 안전시설 설계기준에 대한 고찰, **한국산학기술학회 추계 학술발표논문집**, pp. 350-353.
- 국토해양부 (2005) **항만 및 어항설계기준**.
- 국토해양부 (2005) **도로교 설계기준**.
- 국토해양부 (2005) **건축구조설계기준**.
- 국토해양부 (2009) **항만시설물의 안전시설 설계지침**.
- 박상길, 김기현, 김우생, 박병열, 강덕훈 (2006) 잔교식 안벽의 상부와 Pile에 작용하는 파압분포에 관한 실험적 연구, **한국수자원학회 2006년 학술발표대회논문집**, pp. 552-556.
- 서울특별시 (2001) **시설물 설계 및 시공편람 - 소규모 강교 및 보도육교**.
- 성중수, 이영휘, 송기능, 박정근 (2007) 보도교 진동사용성 기준 검토 및 TMD 적용성·화성동탄 보도교, **한국강구조학회지**, 제 19권, 제 1호, pp. 79-88.
- 이병식, 윤재영, 임남형, 이관호, 박종섭 (2011) **친환경적 연안역 개발 보고서**(2차년도), 공주대학교.
- 일본도로협회 (2005) **도로교 시방서**.
- 채영수, 문하중, 김대규 (2005) 계측에 의한 잔교기초발록의 변위 및 응력 연구, **대한토목학회 2005년 정기학술발표대회논문집**, pp. 4285-4288.
- 한국전력공사 (2004) **가공송전용 철탑설계기준-1111**.
- 환경부 (2002) **방음벽의 성능 및 설치기준**.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (1994). **Standard Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals**. Washington, D.C., USA.
- Buslov, Valery M. and Scola, Philip T. (1991) Inspection and Structural Evaluation of Timber Pier: Case Study, **ASCE Journal of**

Structural Engineering, Vol. 117, No.9, pp. 2725-2741.
Department of Defense(2005), *Unified Facilities Criteria, Design
for Piers and Wharves*, USA.

Zueck, R.F. and Blount, T.A. (2007) Open-Ocean Roll-on/Roll-off
Cargo Pier on San Nicolas Island, *Proceedings of the Eleventh
Triennial International Conference*, No. 238, pp. 78-87.

◎ 논문접수일 : 11년 06월 06일
◎ 심사의뢰일 : 11년 06월 08일
◎ 심사완료일 : 11년 10월 11일