

레이놀즈수에 따른 이순신대교 거더에 작용하는 공기력의 변화

이승호* · 윤자결** · 권순덕***

Seung ho Lee*, Ja geol Yoon**, Soon Duck Kwon***

Aerodynamic Forces Acting on Yi Sun-sin Bridge Girder According to Reynolds Numbers

ABSTRACT : The objective of present study is to investigate the sensitivity of aerostatic force coefficients of twin box girder of Yi Sun-sin Bridge according to the Reynolds numbers. This paper presents the 1:30 scale sectional model tests conducted at high speed wind tunnel in Korea Air Force Academy. Comparison with results at low Reynolds number obtained in KOCED Wind Tunnel Center in Chonbuk National University is also provide. The Reynolds number dependency of aerodynamic force coefficients were observed at present streamlined twin box girder. The drag coefficient revealed significant decrease of nearby 23% at supercritical region. The boundary layer trip strip was found to reduce the Reynolds number dependency of aerodynamic forces by fixing the location of flow transition.

Key words : Reynolds number, wind tunnel test, aerostatic force coefficient, bridge girder, twin box

초 록 : 본 연구에서는 트윈박스 단면인 이순신대교의 레이놀즈수 변화에 따른 공기력의 영향을 살펴보는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 1/30 대축척 모형을 제작하여 공군사관학교 이음속 중형 풍동에서 최대 풍속 70m/s까지 풍속을 증가시켜가면서 공기력을 측정하여, 전북대학교 소형풍동에서 수행한 저레이놀즈수 풍동실험 결과와 비교하였다. 본 연구 대상 교량 단면은 레이놀즈수의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 고레이놀즈수 실험 결과 기존 저레이놀즈수 실험보다 항력계수는 약 23%정도 낮은 수준인걸로 나타났다. 또한 경계층 촉진장치를 효과적으로 이용하면 기존의 저레이놀즈수 풍동실험 조건에서 고레이놀즈수 모사 실험이 가능한 것으로 판단된다.

검색어 : 레이놀즈수, 풍동실험, 공기력, 교량 거더, 트윈 박스

1. 서 론

최근 설계 기술 등의 향상 및 교량 건설지역의 상징성을 표현하기 위해 장경간을 가지는 케이블 지지교량이 다수 건설되고 있다. 교량의 길이가 길어지고 유연해짐에 따라 단면 형상 역시 기존의 각진 형태에서 항공기 날개와 같은 유선형에 가까운 형태로 변화하고 있다. 또한 기존의 싱글 박스의 내풍안정성에 대한 한계점을 극복하고자 다양한 풍동실험을 통해 트윈 박스(Hui, 2002; Kwon, 2008)나 트리플 박스(Brancaleoni, 1993) 같은 새로운 단면 형식을 채용하고 있다.

최근 들어 등장한 새로운 형태의 교량 단면은 기존의 교량 단면 형태인 각진 구조물(bluff body)에서 보이던 공기역학적

* 정희원 · 전북대학교 대형풍동실험센터 선임연구원 (shlee.wind@gmail.com)

** 정희원 · 대림산업(주) 특수교량팀 팀장 (yoonjg@daelim.co.kr)

*** 정희원 · 전북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Professor, Chonbuk National University · sdkwon@chonbuk.ac.kr)

Received August 20 2012, Revised November 14 2012, Accepted November 20 2012

특성과 다른 형태를 보이고 있다. 이러한 다른 공기역학적 특성에 대한 현상을 규명하고자 몇몇 연구자들에 의해 다음과 같은 연구가 진행되었다. Schewe(2001)은 고압력 풍동에서 원형실린더(circular cylinder), 에어포일 단면(sharp-edged) 및 교량(Great Belt bridge) 단면을 대상으로 레이놀즈수의 영향에 따른 공기력 및 Strouhal number의 변화에 대한 실험을 수행하였으며, 교량 단면의 경우에도 임계레이놀즈수(Critical Reynolds number) 구간이 발생함을 확인하였다. Larose 등은(2003, 2006) 트윈박스 단면을 가지는 Stonecutter bridge의 레이놀즈수 변화에 따른 공기력의 변화를 알아보기 위해 1/20의 대축적 고레이놀즈수 풍동실험을 수행하였으며, 실험 결과 항력계수가 기존의 풍동실험에서 측정한 항력계수보다 약 30% 증가하였다. 그리고 겹 간격 및 영각 조건에 따른 레이놀즈수 영향에 대한 평가도 몇몇 연구자들에 의해 일부 수행되었다(Kubo, 1999; Matsuda, 2001; Hui, 2002).

일반적으로 교량 단면의 형태에 따라서 교량에 작용하는 풍하중은 크게 달라지게 되며, 현재 설계시 교량에 작용하는 풍하중은 풍동실험에서 구한 공기력을 바탕으로 설계에 반영하고 있다. 하지만 실제 자연현상보다 약 10배에서 100배 가까이 낮은 레이놀즈수 영역에서 측정된 공기력은 실험 조건에 따라서 과소 평가되거나 혹은 과대 평가될 수가 있다. 기존 저레이놀즈수 영역에서 실험한 풍동실험 결과가 실제로 구조물 설계에 유용한 데이터가 되기 위해서는 반드시 레이놀즈수에 독립적인 범위 내에서 수행되어야 하며, 저레이놀즈수 풍동실험의 한계를 이해하고 레이놀즈수의 영향을 정확히 평가하여야 한다. 이에 본 연구에서는 유선형 단면을 가지는 이순신대교를 대상으로 1/30의 대축적 모형을 제작하여 레이놀즈수에 민감도에 대한

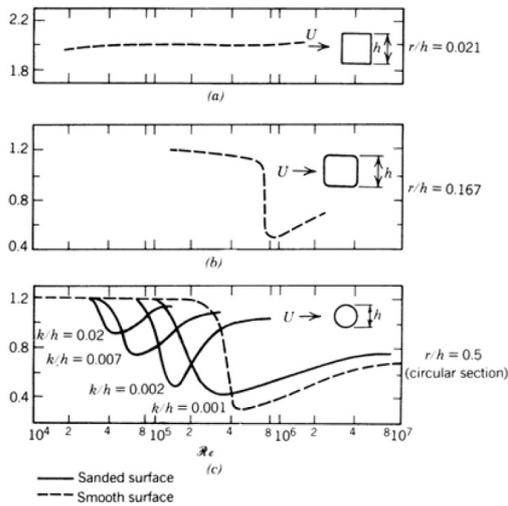


Fig. 1. Effect of the Reynolds number on drag coefficients (Scruton and Rogers, 1971; Simiu and Scanlan 1996)

연구를 수행하였다.

2. 레이놀즈수(Re)와 기류의 흐름

레이놀즈수는 관성에 의한 힘과 점성에 의한 힘의 비로 유체 동역학에서 가장 중요한 무차원 수 중 하나이다. 공기를 매질로 하는 풍동실험에서는 공기의 관성 영향 즉 단위 시간당 통과하는 유체의 질량과 밀접한 관계가 있는 계수이다. 레이놀즈수는 다음과 같은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 공기밀도, V 는 접근기류의 풍속, L 는 구조물의 특성길이, μ 는 공기의 점성계수이다. 잘 알려진 바와 같이 원형실린더를 지나는 기류는 레이놀즈수에 따라 다양하게 변한다. 레이놀즈수가 낮을 때는 원형실린더를 따라 기류가 흘러가기 때문에 기류의 박리현상이 발생하지 않는다. 그러나 레이놀즈수가 증가함에 따라 표면을 따라 더 이상 기류가 흘러가지 못하고 박리되는 현상이 발생하게 된다. 그리고 레이놀즈수가 2×10^5 을 넘게 되면 유동 박리점의 위치가 급격하게 바뀌고 후류 영역이 좁아지면서 항력계수에 큰 변화를 보인다. 원형실린더의 경우 레이놀즈수 2×10^5 을 임계 레이놀즈수(critical Reynolds number)라 한다.

한편 Fig. 1에서와 같이 각이 진 구조물은 원형실린더와는 다른 기류 변화를 보이고 있으며, 보통 레이놀즈수 1.1×10^4 부터 레이놀즈수 독립적인 구간으로 알려져 있다. 교량 단면의 경우 실제보다 10~100배 낮은 레이놀즈수에서 풍동실험을 통하여 풍하중을 산정하고 있으나, 일반적으로 각진 형상이므로 레이놀즈수의 영향이 작다고 판단되어 설계에 반영하고 있다.

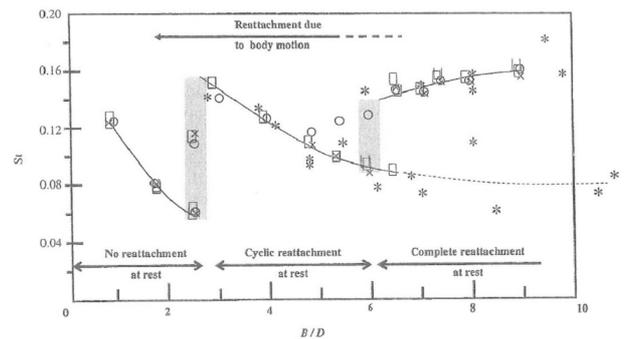


Fig. 2. The Strouhal number and flow reattachment according to aspect ratio of rectangular cylinder (Okajima et al., 1983; Simiu and Miyata, 2006)

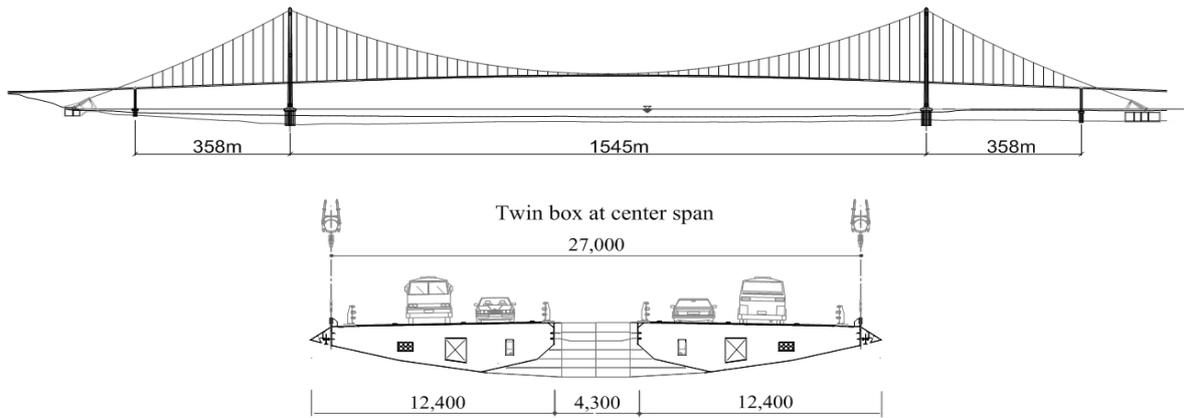


Fig. 3. The Yi Sun-sin Bridge

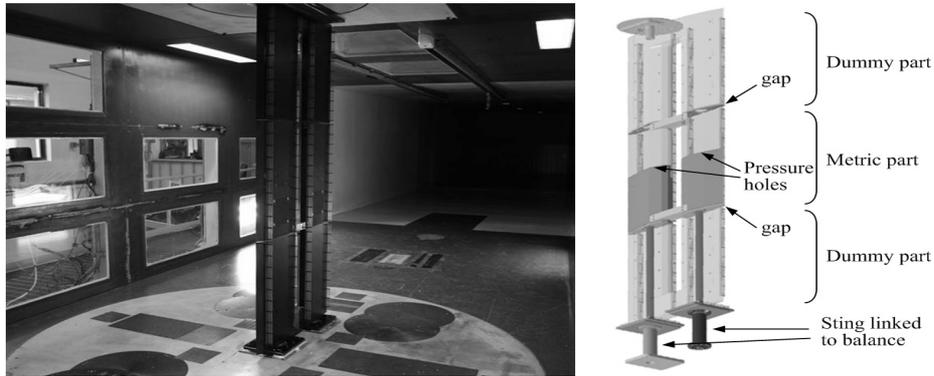


Fig. 4. Bridge model at wind tunnel in the Korea Air Force Academy

사각단면의 경우 폭고비(B/D)가 6이상인 경우 재부착점이 사각단면 내에 모두 들어오는 것으로 알려져 있다(Fig. 2). 교량 단면의 경우에도 폭고비가 큰 사각단면처럼 그 기하학적인 특성으로 인해 풍상측에서 박리된 기류의 재 부착점이 교량 단면 내에 위치하게 된다. 이러한 특성은 Fig. 2의 경우와 같이 레이놀즈수에 따라 다른 공기역학적인 특성을 보일 수가 있다. 그러나 사각단면이나 교량의 경우에는 레이놀즈수에 따라 박리되는 지점이 비교적 일정하므로 재부착점 역시 비슷한 경향을 보이며, 공기역학적 특성 또한 비슷한 경향을 보인다. 하지만 최근 등장한 트윈 박스나 트리플 박스와 같은 갭을 가지는 유선형 단면의 경우 레이놀즈수에 따라 박리점과 재부착점이 달라지며, 교량 단면 중앙부 갭의 영향으로 보다 복잡하고 다양한 기류 형상을 보일 수 있다.

3. 그레이놀즈수 풍동실험

3.1 연구 대상 교량

본 연구의 대상이 되는 교량은 주경간장이 1,545m이고 주탑

의 높이가 270m가 넘는 세계적인 규모의 3경간 현수교이다. 거더의 폭은 29.1m이지만 높이는 3m로 경간장에 비해 매우 기는 보강형을 지니고 있다. 또한 국내 최초의 트윈박스 교량이며, 트윈박스 갭 사이즈가 4.3m로 최적화 되어 경제적이며 공기역학적으로 유리한 단면을 가지고 있다(Fig. 3).

3.2 모형의 제작

대축척 부분모형의 축척은 풍동의 크기와 여러 가지 조건을 고려하여 1/30으로 결정하였다. 축척이 1/30일 경우에 길이 2.4m인 모형은 실제 교량의 72m 구간을 모델링한 것이다. 모형의 외형은 풍속 70m/s이상에서도 견딜 수 있는 알루미늄과 강재를 사용하여 충실히 재현하였다. 모형은 측정을 위한 한 개의 metric part와 3차원 효과를 막기 위한 두 개의 dummy part로 구분하였다.

Dummy part와 metric part 사이의 갭은 2.5mm이내로 최소화 하였고, 모형의 진동으로 부딪혀 힘이 전달되는 경우를 막기 위해 fouling sensor를 설치하여 dummy part와 metric part가 닿았을 경우 신호음이 울리도록 연결하였다. 모형 전체 무게는

Table 1. Wind tunnels and bridge models

Name	Wind tunnel			Model			Reynolds number
	Width(m)	Height(m)	Speed(m/s)	Width(m)	Length(m)	Scale	
KOCED	1	1.5	0.5 ~ 20	0.42	0.9	1:70	0.15×10^5
KAFA	3.5	2.45	5 ~ 90	0.97	0.8	1:30	$0.30 \times 10^5 \sim 2.07 \times 10^6$

Table 2. External balance

Type	External pyramidal balance
Accuracy	± 0.006 % FS
Angle of attack range	-25 ~ +50 deg
Yawing angel range	± 30 deg

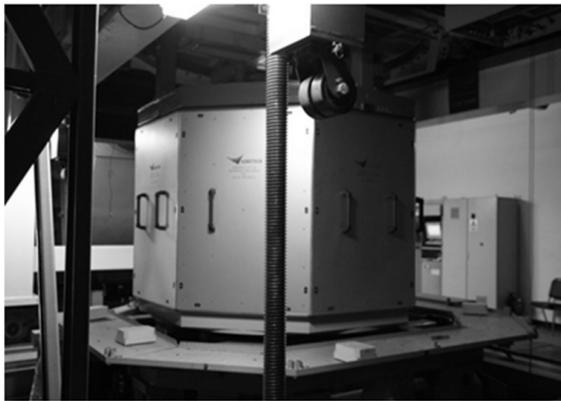


Fig. 5. External pyramidal balance

약 250kg이며, 측정을 위한 metric part의 길이는 0.8m이다. dummy part가 하부의 2개의 스탱을 통해 외부 피라미드식 밸런스에 직접 연결된다.

3.3 실험 시설 및 실험 장비

본 연구에서는 레이놀즈수 민감도 분석을 위해 다른 2개의 실험시설에서 풍동실험을 각각 수행하였다. 실험을 수행한 전북대학교 소형풍동과 공군사관학교 이음속 풍동의 크기 및 제한은 Table 1에 나타나 있다. 공기력 측정을 위해 공군사관학교 피라미드식 외부밸런스(Table 2, Fig. 5)를 이용하여 모형에 작용하는 공기력을 측정하였다.

4. 공기력 측정

4.1 실험 조건

공기력 측정 실험시 기류는 등류로 한정하였으며 가드레일의 유무와 경계층 촉진장치 부착에 따른 변화를 살펴보았다. 가드레일의 조건 변화에 따라 영각은 -5도에서 +5도까지 달리하여

Table 3. Test cases

No	Stage	Installation		Wind speed (m/s)	Angle of attack (deg)
		Safety rail	Trip strip		
Case 1	Construction	×	×	10 ~ 45	+3 ~ -3
Case 2	Completion	○	×	10 ~ 70	+5 ~ -5
Case 3	Completion	○	○	10 ~ 45	+5 ~ -5

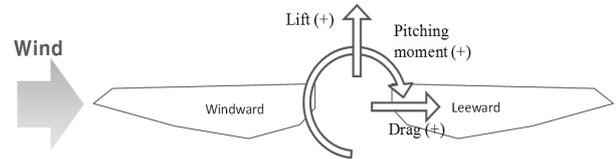


Fig. 6. Aerostatic forces acting on bridge



Fig. 7. Boundary layer trip strip

실험을 응답을 측정하였다(Table 3). 공기력의 정의는 Fig. 6에 나타나 있다. Case3 조건에서 사용한 경계층 촉진장치는 0.29mm의 두께를 가지고 있으며 풍상측에 페어링 끝단에서 약 1.1m 떨어진 거더 하부에 설치하였다(Fig. 7).

구조물에 작용하는 단위길이당 항력(D), 양력(L), 피칭모멘트(M_z)로부터 정적 공기력계수는 다음과 같이 구해진다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 B}, \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 B}, \quad C_M = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \rho V^2 B^2} \quad (2)$$

여기서, V 는 접근 풍속 B 는 단면 폭으로 0.97m를 ρ 는 공기밀도로 1.25 kg/m^3 를 사용하였다.

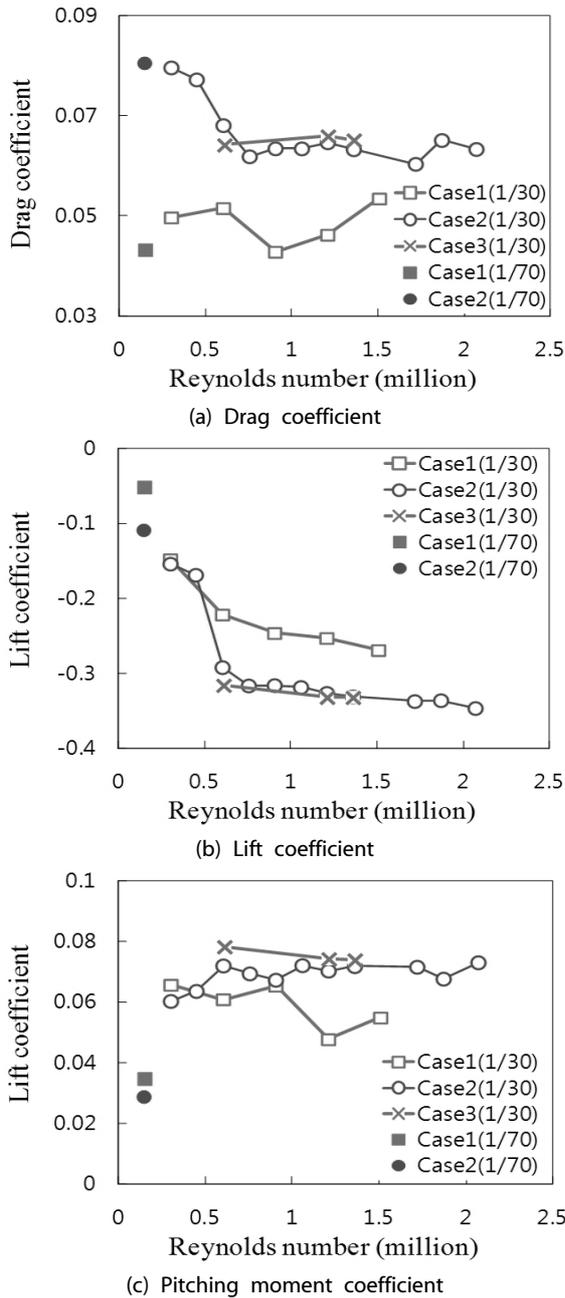


Fig. 8. Aerostatic force coefficients according to the Reynolds number

4.2 레이놀즈수에 따른 영향

실험 조건별 풍속에 따른 공기력 측정 결과를 전북대학교 소형풍동에서 수행한 1/70 모형 결과와 비교하였다(Fig. 8). 이때 레이놀즈수는 트윈박스 교량의 전체 폭(B)이 아닌 거더 하나의 단면 폭(b)으로 무차원화 하였다.

가드레일이 없는 Case 1의 경우 레이놀즈수의 영향을 크게

Table 4. Test results (Case2)

Re	C _D	C _L	C _M
1.50×10^5	0.0830	-0.0960	0.0370
3.03×10^5	0.0796	-0.1542	0.0602
4.50×10^5	0.0772	-0.1690	0.0635
6.05×10^5	0.0681	-0.2922	0.0719
9.07×10^5	0.0634	-0.3161	0.0672
1.21×10^6	0.0646	-0.3266	0.0703
1.36×10^6	0.0633	-0.3314	0.0717
1.87×10^6	0.0651	-0.3363	0.0676
2.07×10^6	0.0633	-0.3468	0.0730

받는 것으로 나타났으며, 항력계수의 경우 가드레일이 있는 경우(Case 2)의 항력계수보다 약 38% 정도 작게 측정되었으며, 양력 및 피칭모멘트 역시 다른 실험조건에 비해 상대적으로 작은 값을 보인다. 이는 연구대상 교량의 높이가 매우 낮아서 상대적으로 가드레일이 받는 수풍 면적이 상당하기 때문인 것으로 판단된다. 가드레일이 설치된 Case 2의 경우 레이놀즈수 증가에 따라 항력계수는 감소하고 양력계수 및 피칭모멘트 계수는 증가하는 것으로 나타났으며, 기존 1/70 저레이놀즈수 실험 결과와 상당히 연속된 값을 보이고 있다.

이순신대교 거더의 경우에 레이놀즈수 $1.5 \times 10^5 \sim 9.1 \times 10^5$ 영역에서 항력과 양력이 급격한 변화를 보이는 임계 레이놀즈수(Critical Reynolds number) 영역이 나타났다. 실제 자연현상에 가까운 고레이놀즈수 영역에서는 기존 저레이놀즈수 풍동실험에서 측정한 공기력계수 결과보다 항력계수가 약 23% 줄어드는 것으로 나타났다. 경계층 축진장치를 추가로 부착한 Case 3의 경우 Case 2와 매우 유사한 실험 결과를 보이고 있는 것으로 보아 영각 0도에서는 경계층 축진장치를 이용하여 하부 단면의 박리점을 달리하여도 전체 공기력에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

4.3 영각에 따른 영향

1) 가드레일이 없는 경우 (Case 1)

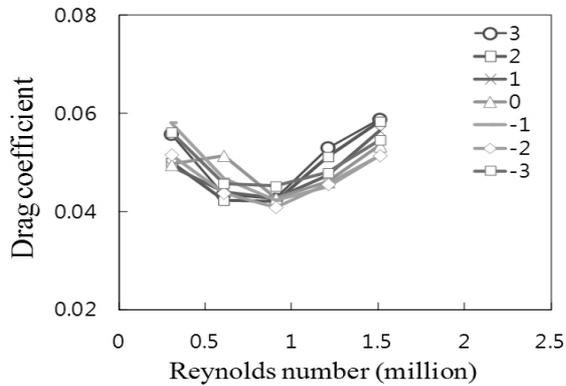
가드레일이 없는 실험 조건 항력계수의 경우 모든 영각에서 레이놀즈수의 영향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 임계 레이놀즈수(Critical Reynolds number)에서 초임계 레이놀즈수(Supercritical Reynolds number) 영역에 걸친 실험 결과를 보이고 있다. 이는 가드레일이 없는 실험 조건의 교량 단면의 경우 각진 구조물이 아니라 오히려 유선형에 더 가깝기 때문이며, 실험 결과가 Fig. 1의 원형실린더와 유사한 형태의 항력계수 분포를 보이고 있다.

2) 가드레일이 설치된 경우 (Case 2)

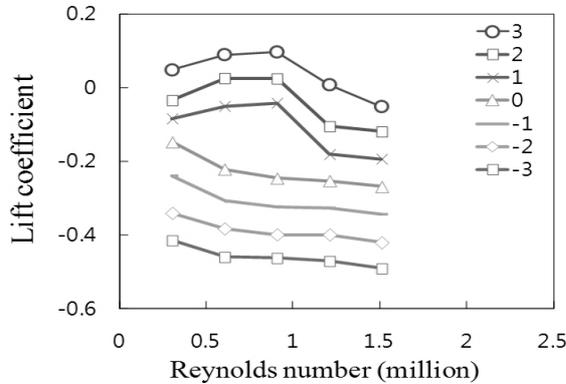
가드레일이 설치된 실험 조건의 경우 영각 0도 및 (+)영각에서 레이놀즈수 영향을 받으며, 일부 영각 특정 풍속(레이놀즈수)에서 큰 변화를 보였다. 이는 일부 영각 특정 풍속에서 기류가 풍상측 거더에서 박리 후 재 부착점이 풍하측 거더 위에 있는 경우이며 이러한 이유로 풍하중이 급격하게 변화하게 된다. 또한 Fig. 10(b)의 실험 결과에서 알 수 있듯이 양력계수의

경우 (+)영각 조건이 증가함에 따라 양력이 급변하는 풍속(레이놀즈수) 구간도 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

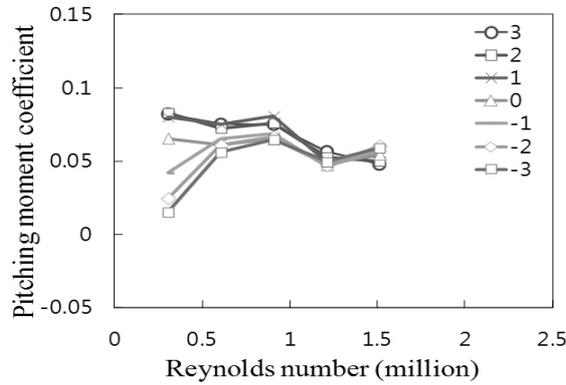
반면 (-)영각에서는 가드레일의 영향으로 공기력이 레이놀즈수에 독립적인 것으로 나타났다. 이는 (-)영각 조건하에서는 가드레일이 일종의 스크린과 같은 역할로 기류를 교란시켜 레이놀즈수 효과를 상쇄하기 때문이다.



(a) Drag coefficient

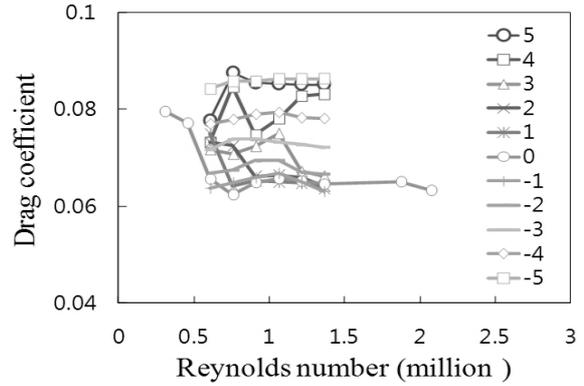


(b) Lift coefficient

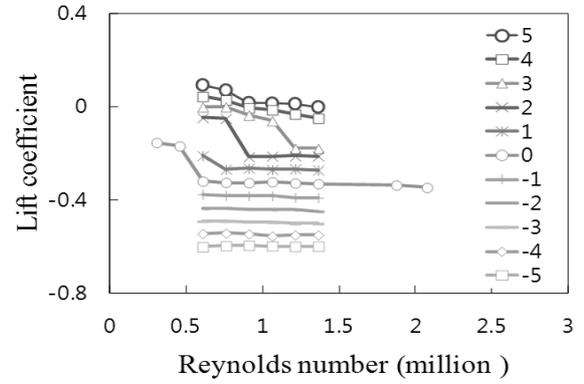


(c) Pitching moment coefficient

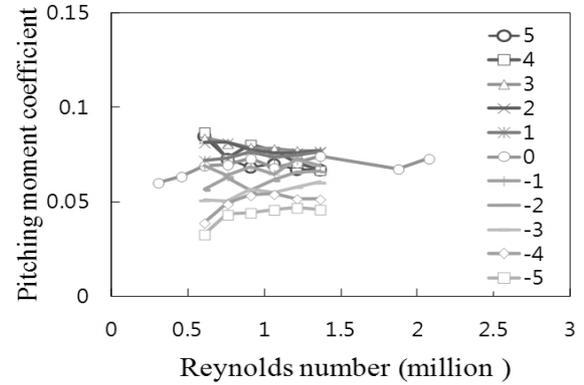
Fig. 9. Aerostatic force coefficients according to attack angle (Case1)



(a) Drag coefficient



(b) Lift coefficient



(c) Pitching moment coefficient

Fig. 10. Aerostatic force coefficients according to attack angle (Case2)

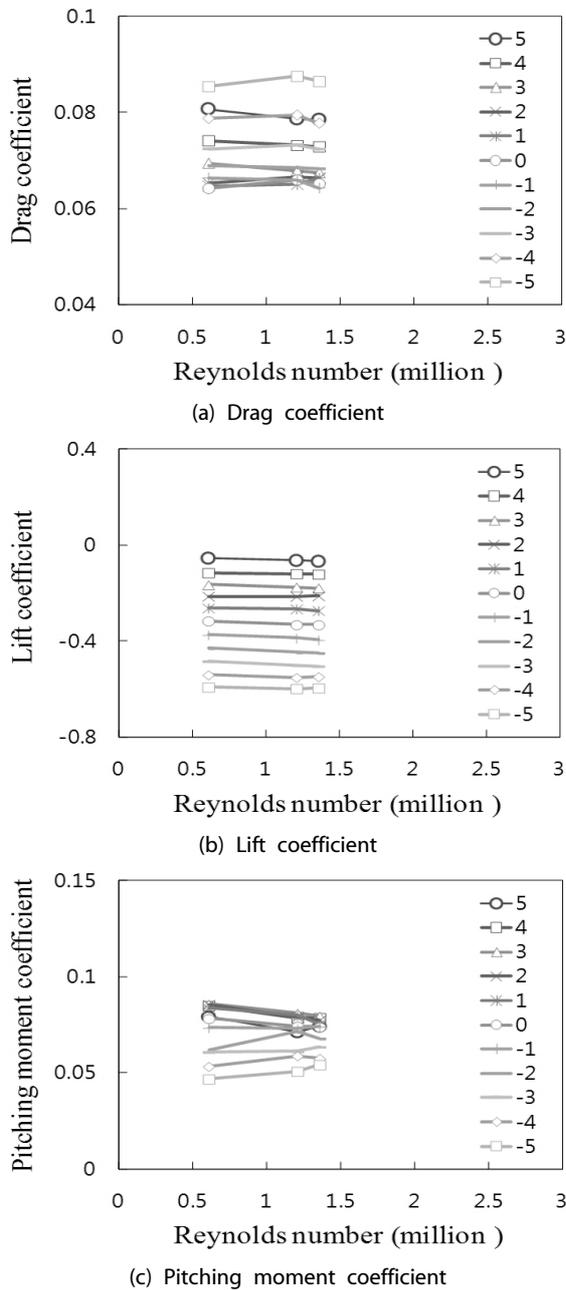


Fig. 11. Aerostatic force coefficients according to attack angle (Case3)

3) 가드레일 및 경계층 촉진장치가 설치된 경우 (Case 3)

가드레일과 경계층 촉진장치가 둘 다 설치된 경우 모든 영각에서 공기력이 레이놀즈수에 독립적인 것으로 나타났다. 이는 경계층 촉진장치가 기류의 박리점을 일정하게 함으로써 Case 2 조건에서 나타나던 레이놀즈수 효과를 상쇄하기 때문이다. 이러한 결과로 미루어보아 연구 대상 교량의 박리 후 재부착점에 대한 기류 특성이 충분히 파악된 경우에 경계층 촉진장치를

적절한 위치에 부착하면 저레이놀즈수 실험 조건에서 고레이놀즈수 모사실험이 가능하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 레이놀즈수에 따른 공기력계수의 민감도를 평가하기 위하여 이순신대교의 유선형 트윈박스를 대상으로 축척 1:30 강제 모형을 제작하고 최대풍속 70m/s 조건하에서 공기력을 측정하였다. 이러한 고레이놀즈수 풍동실험 결과와 기존 저레이놀즈수 풍동실험 결과와 비교 분석하였으며, 그 결과를 정리하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 연구대상인 이순신대교 트윈박스 거더에 작용하는 공기력은 레이놀즈수의 영향을 상당히 받는 것으로 나타났다. 특히 항력과 양력의 급격한 변화가 발생하는 임계 레이놀즈수 영역은 $1.5 \times 10^5 \sim 9.1 \times 10^5$ 인 것으로 나타났다.
- (2) 가드레일이 없는 경우 레이놀즈수의 영향을 훨씬 더 많이 받는 것으로 나타났으며, 항력계수의 경우 가드레일이 있는 경우에 비해 약 38% 정도 작게 측정되었다. 이는 연구대상 거더의 높이가 매우 낮아서 상대적으로 가드레일이 받는 수평 면적이 상당히 크기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 가드레일이 설치된 경우에 레이놀즈수가 증가함에 따라 항력계수는 감소하고 양력계수 및 피칭모멘트 계수는 증가하는 것으로 나타났다. 실제 자연 현상에 가까운 초임계 레이놀즈수 영역에서는 항력계수가 기존 저레이놀즈수 풍동실험에서 측정된 결과보다 약 23% 줄어드는 것으로 나타났다.
- (4) 가드레일이 설치된 경우에 (+) 영각에서 레이놀즈수 영향을 상당히 받으며, 영각에 따라 임계 레이놀즈수 구간이 바뀌는 것으로 나타났다. 하지만 (-) 영각에서는 가드레일의 영향으로 공기력이 레이놀즈수의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 가드레일 때문에 기류의 박리점이나 특성이 고정되기 때문인 것으로 판단된다.
- (5) 가드레일과 경계층 촉진장치가 둘 다 설치된 경우에, 모든 영각에서 레이놀즈수가 공기력에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 이는 경계층 촉진장치가 기류의 박리점을 일정하게 함으로써 (+) 영각에서 나타났던 레이놀즈수의 영향을 없앴 것으로 판단된다.

결론적으로 이순신대교 거더와 같은 유선형 단면의 경우에 레이놀즈수에 따라 공기력계수가 상당히 바뀌는 것으로 나타났으며, 기존 저레이놀즈수 풍동실험이 안전측의 결과를 제시하지만 교량의 경제성을 고려하면 고레이놀즈수 풍동실험을 통하여 공기력을 정밀하게 측정할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

- KSCE (2006) *Design Guideline for Cable Supported Steel Bridges*, Korean Society of Civil Engineers.
- JSCE (2003) *Wind Resistant Design of Bridges-Specifications and Recent Developments*. Japanese Society of Civil Engineers.
- Korea Air Force Academy http://www.afa.ac.kr/index_frame_kk.html.
- Brancaleoni, F., Diana, G. (1993) The aerodynamic design of the Messina Straits Bridge, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 48, pp. 2-3.
- Fok, C.H., Kwok, K.C.S., Qin, X.R., Hitchcock, P.A. (2005) Wind-induced pressures around a sectional twin-deck bridge model, *The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Seoul.
- Gimsing, N.J. (1997) *Cable Supported Bridges*, John Wiley & Sons.
- Hui, M.C.H., Karsen, A. (2002) Aerodynamic investigation for the deck of Stonecutter Bridge emphasizing Reynolds number effects, *The 2nd International Symposium on Wind and Structures*, Busan.
- Kwon, S.D., Lee, S.H., Uejima, H., Lee, M.J. (2008) Wind resistance design of Kwangyang Bridge, *Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics*, CRC Press.
- Larose, G. L., D'Auteuil, A. (2004) Experiments on 2-D rectangularprisms at high Reynolds number in a pressurized wind tunnel, *Proceedings of fifth international symposium on Bluff Body Aerodynamics and Applications*, pp. 177-180, Ottawa.
- Larose, G. L., D'Auteuil, A. (2006) One the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 94, pp. 365-376.
- Matsuda, K., Cooper, K.R., Tanaka, H., Tokushige, M., Iwasaki, T. (2001) An investigation of Reynolds number effects on the steady and unsteady aerodynamic forces on a 1:10 scale bridge deck section model, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 619-632.
- Okajima, A., Sugitani, K. and Mizota, T. (1983) Strouhal number and back pressure coefficients of rectangular cylinders (height to width ratio 1:9), *J. Mech. Engineering*, Vol. 49, pp. 1-13 (in Japanese).
- Schewe, G. (2001) Reynolds-number effects in flow around more-or-less bluff bodies, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 1267-1289.
- Schewe, G., Larsen, A. (1998) Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, pp. 829-838.
- Scruton, C and Rogers E. W. E. (1971), Steady and unsteady wind loading of buildings and structures, *Phil Trans. Roy. Soc.*, Vol. A269, pp. 353-383.
- Simiu, E. and Scanlan, R.H, (1996) *Wind Effects on Structures*, Wiley.
- Simiu, E. and Miyata, T. (2006) *Design of Buildings and Bridges for Wind*, Wiley.