

사장교의 내풍해석을 통한 인명보호 구조물의 내하능력평가

Load-carrying Capacities of Safety Structures on Wind-resistant Analyses of Cable-stayed Bridge

허택녕*

Taik-Nyung Huh*

〈Abstract〉

In the 2000s, a lot of cable-type grand bridges are being built in consideration of economic aspects such as the reduction of logistics costs and the distribution of traffic volume due to rapid economic development. In addition, because the recently installed grand bridges are designed in an aesthetic form that matches the surrounding environment as well as the original function of the road bridge, and serves as a milestone in an area and is used as an excellent tourism resource, attracting many vehicles and people, there is an urgent need for a safety structure that can ensure the safety of not only vehicles but also people. In order to make cable-stayed bridge safe on wind for additional five safety structures, main girder models with and without safety structures for wind-tunnel experiments was made, and wind tunnel experiments was carried out to measure aerodynamic force coefficients. Also, wind-resistant analyses of 3D cable-stayed bridge were performed on the basis of wind-tunnel experiment results. From the wind tunnel experiments for the aerodynamic force coefficients of main girder with five safety structures and the wind resistant analyses of cable-stayed bridge without safety structure and with safety structure, it was concluded that the best form of wind-resistant safety was shown in the order of mesh, standard, bracing, hollow, and closed type. And wind-resistant safety of cable-stayed bridge with hollow and closed type on design wind speed 68.0m/sec was not secured. Finally, as five safety structures are installed, maximum rate of stress increments was shown in the order of steel main beam, steel floor beam, concrete floor beam and cables.

Keywords : Load-carrying Capacity, Safety Structure, Wind-resistant Analysis, Cable-stayed Bridge, Safety Evaluation

* 정회원, 교신저자, 창원대학교 스마트그린공학부, 건설시스템
공학전공, 정교수
E-mail: tnhuh@changwon.ac.kr

* Regular member, Corresponding author, School of Smart &
Green Engineering, Dept. of Civil Engineering, Changwon
National University

1. 서론

2000년대에 들어 급속한 경제발전으로 따른 물류 비용 감소와 교통량 분산과 같은 경제적인 측면이 고려하여 케이블 형식의 장대교량이 많이 건설되고 있다. 이와 같은 목적으로 국내에 가설되어 운용 중인 대표적인 장대 케이블 교량으로 사장교 형식의 진도대교와 돌산대교(1984년), 서해대교(2000년)가, 현수교 형식의 영종대교(2000년), 광안대교(2002년), 인천대교(2009년)와, 거가대교(2010년)가 있다. 이와 같은 장대 케이블 교량은 일반형교의 교량보다 긴 지간을 가지게 되고 많은 교각을 필요로 하지 않기 때문에 해상교량 혹은 연육교량으로 계획되어 가설되어지고 있고, 미래에도 많이 가설될 것으로 예상된다.

또한 최근에 가설되는 장대교량은 도로교 본래의 기능뿐만 아니라 주변환경과 어울리는 미적형태로 설계되어 있어 한 지역의 이정표적인 역할을 하고 있을 뿐만 아니라 훌륭한 관광자원으로 활용되고 있어 많은 차량과 사람들이 찾아오고 있지만, 차량뿐만 아니라 사람의 안전을 확보할 수 있는 안전구조물이 설치된 경우는 많지 않다.

또한, 케이블 형식의 장대교량은 횡방향으로 작용하는 풍하중의 영향이 매우 큰 교량형식이며, 온도하중과 케이블의 초기인장력에 따라 그 거동이 매우 복잡한 고차의 부정정 구조물이다.

따라서 교량위를 보행하는 사람의 안전확보에 보편적으로 많이 사용되는 5가지 형태의 안전구조물에 대한 내풍해석을 통하여 안전구조물 자체의 내풍안전성과 인명보호 구조물 설치에 따른 사장교의 내풍안전성을 차례로 검토할 것이다. 이를 위해 사장교 주형의 풍동실험을 수행하여 공기력 계수를 평가하고, 사장교와 안전구조물을 3차원 유한요소로 모형화한 후, 도로교 시방서에 근거하여 내풍해석을 수행할 것이다.

2. 인명보호 구조물의 내풍해석

본 장에서는 도로교 시방서의 내풍설계기준에 따라 다양한 인명보호 구조물의 내풍해석을 수행하여 최고의 내풍안전성을 가지는 인명보호 구조물을 제안하고자 한다. 이를 위해 내풍해석에 필요한 설계기준풍속은 도로교 시방서에서 제시한 기준에 따라 기본풍속은 40m/sec로, 설계기준풍속은 68.0m/sec로 각각 산정하였다. 또한 인명보호 구조물이 없는 경우와 있는 경우에 대하여 각각 풍동실험을 수행하여 항력, 양력과 모멘트에 대한 공기력 계수를 평가하였다[1,2].

2.1 인명보호 구조물의 형태

Fig. 1 ~ Fig. 5에는 인명보호 구조물로 현재

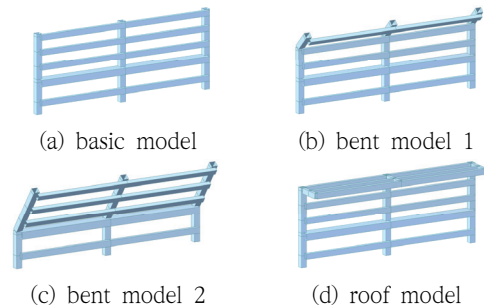


Fig. 1 Standard types of safety structure

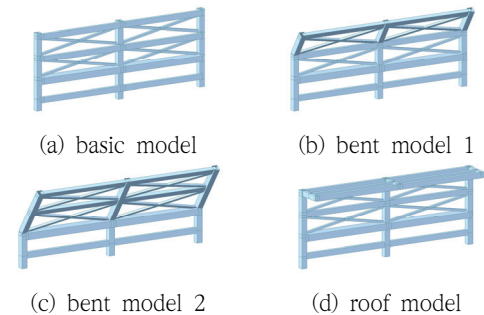


Fig. 2 Bracing types of safety structure

널리 사용되고 있는 일반형, 브레이싱형, 메쉬형, 밀폐형과 중공형을 각각 도시하였다. 또한 각각의 기본형을 변형하여 절곡형1, 절곡형2와 지붕형의 3가지 형태를 추가로 적용하여 총 20개의 인명보호 구조물의 형태를 제시하였다.

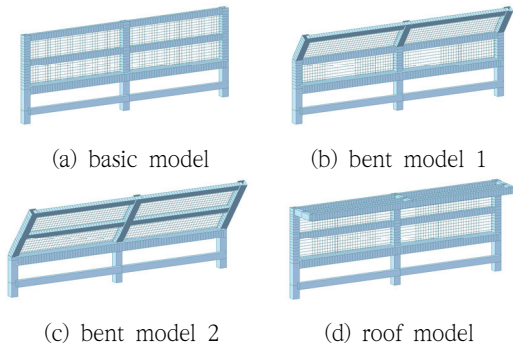


Fig. 3 Mesh types of safety structure

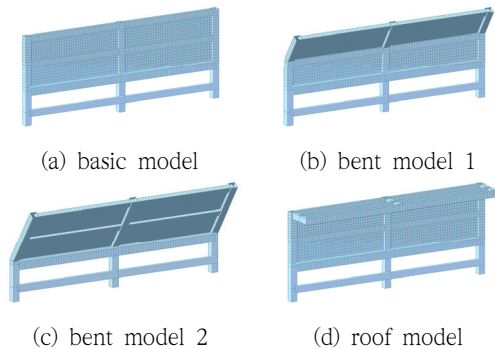


Fig. 4 Closed types of safety structure

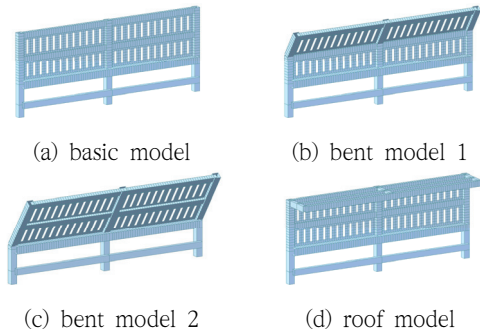


Fig. 5 Hollow types of safety structure

2.2 인명보호 구조물의 내풍해석

본 절에서는 동일한 물량을 갖는 일반형, 브레이싱형, 메쉬형, 밀폐형과 중공형 인명보호 구조물의 내풍해석을 수행한다.

인명보호 구조물의 물성치는 기존에 설치되어 있는 난간의 것과 동일하게 탄성계수는 6.89×10^7 kN/m²을, 포아손비는 0.66을 각각 사용하였다. 수직부재의 단면은 가로 7.5cm, 높이 12cm와 두께 0.4cm인 상자형단면을, 수평부재는 가로 7.5cm, 높이 12cm와 두께 0.4cm인 상자형단면과 25.0cm, 높이 14.5cm와 두께 0.4cm인 상자형단면을 각각 사용하였다. 마지막으로 인명보호 구조물의 높이는 굴절점검차량에 영향을 주지 않는 높이인 180cm로 동일하게 가정하였고, 구조물의 내풍해석에는 범용 유한요소 프로그램인 MIDA/CIVIL을 사용하였다.

2.3 인명보호 구조물의 내풍안전성

본 절에서는 전절에서 수행된 각 인명보호 구조물에 대한 내풍 안전성을 비교하여 검토하고자 한

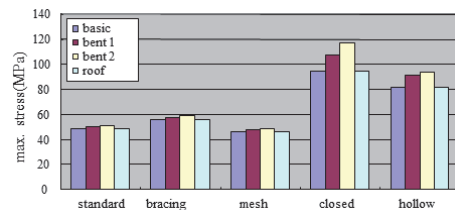


Fig. 6 Max. stresses of safety structures

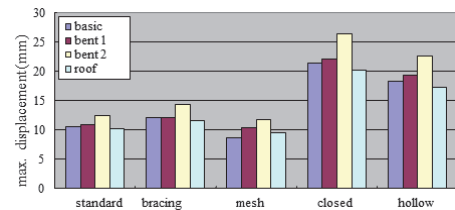


Fig. 7 Max. displacement of safety structures

다. Fig. 6과 Fig. 7에는 내풍해석을 통하여 얻은 각 인명보호 구조물에서 발생하는 최대응력과 최대변위를 각각 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 구조물에 발생하는 최대응력과 변위는 메쉬형에서 가장 작게 나타나고 있으며, 밀폐형에서 가장 크게 나타남을 알 수 있었고, 메쉬형, 일반형, 브레이싱형, 중공형과 밀폐형 순서로 내풍안전성이 감소함을 알 수 있다. 또한 동일한 인명보호 구조물에서 발생하는 최대응력은 수직형, 지붕형, 절곡1형과 절곡2형으로 증가하는 경향을 모든 구조물에서 보였고, 최대변위는 지붕형에서 가장 작게 나타나고 있음을 확인하였다. 이는 지붕형이 일반형에 비하여 보다 수평저항력이 크기 때문에 발생하는 것으로 사료된다.

3. 사장교의 내풍해석

본 장에서는 인명보호 구조물 설치에 따른 사장교의 내풍해석에 기초하여 내풍 안전성을 검토하고자 한다. 이를 위해 사장교와 인명보호 구조물을 3차원 유한요소로 모형화하여, 인명보호 구조물이 설치 혹은 미설치 경우에 대하여 내풍해석을 수행하였다.

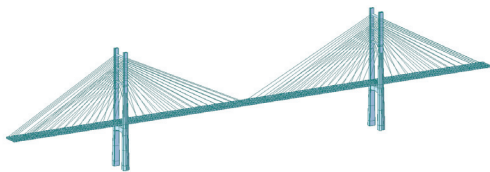


Fig. 8 FE model of cable-stayed bridge

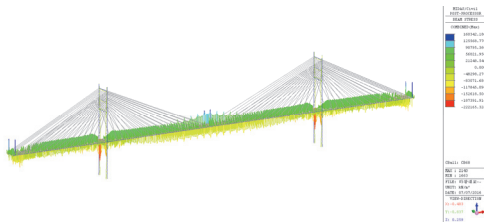


Fig. 9 Stress distributions of cable-stayed bridge

내풍해석의 설계기준풍속으로 68.0m/sec로 산정하였고, 하중조합으로 자중, 지점침하, 풍하중, 케이블 및 PS의 긴장력으로 구성하였고 이에 대한 할증계수로 1.25를 사용하였다. 이와 같은 자료를 이용하여 수행된 내풍해석 결과로부터 강재주형, 가로보와 케이블의 최대응력 및 증분치를 산정하여 사장교의 안전성을 확보할 수 있는 가장 역학적으로 최적의 인명보호 구조물을 선정할 것이다[3,4].

3.1 인명보호 구조물이 없는 경우

본 절에서는 인명보호 구조물 설치에 따른 사장교의 안전성 검토에 기초자료를 얻기 위하여 인명보호 구조물이 없는 사장교의 내풍해석을 수행한다. Fig. 8에는 인명보호 구조물이 없는 사장교의 3차원 유한요소모형을 도시하였고, Fig 9에는 유한요소 해석으로부터 얻은 응력분포를 도시하였다.

3.2 인명보호 구조물이 설치된 경우

본 절에서는 인명보호 구조물 설치에 따른 사장교의 내풍해석을 수행하여 사장교 자체의 안전

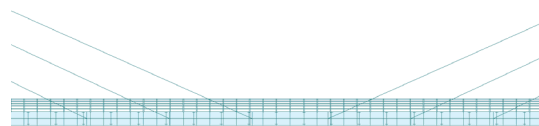


Fig. 10 Enlarged FE model with standard type

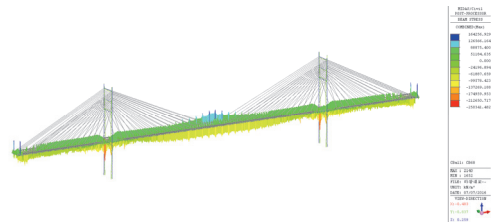


Fig. 11 Stress distr. of bridge with standard type

성뿐만 아니라 인명보호 구조물의 안전성도 같이 검토한다. Fig. 10에는 일반형의 인명보호 구조물이 설치된 상세모형을 도시하였고, Fig. 11에는 사장교에 발생하는 응력분포를 각각 도시하였다.

Fig. 12에는 브레이싱형의 인명보호 구조물이 설치된 상세모형을 도시하였고, Fig. 13에는 사장교에 발생하는 응력분포를 각각 도시하였다.

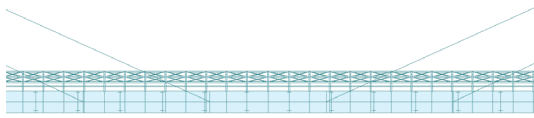


Fig. 12 Enlarged FE model with bracing type

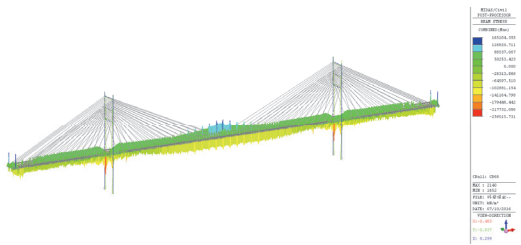


Fig. 13 Stress distr. of bridge with bracing type

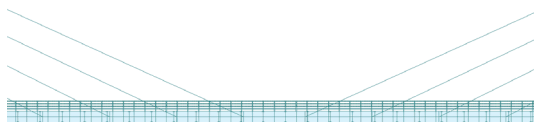


Fig. 14 Enlarged FE model with mesh type

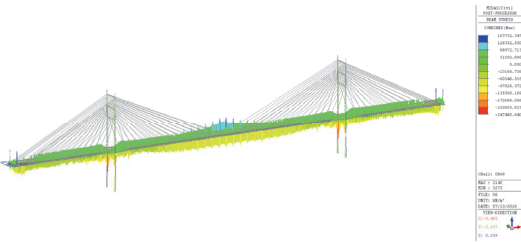


Fig. 15 Stress distr. of bridge with mesh type

Fig. 14에는 메쉬형의 인명보호 구조물이 설치된 상세모형을 도시하였고, Fig. 15에는 사장교에 발생하는 응력분포를 각각 도시하였다.

Fig. 16에는 밀폐형의 인명보호 구조물이 설치된 상세모형을 도시하였고, Fig. 17에는 사장교에 발생하는 응력분포를 각각 도시하였다.

Fig. 18에는 중공형의 인명보호 구조물이 설치된 상세모형을 도시하였고, Fig. 19에는 사장교에 발생하는 응력분포를 각각 도시하였다.

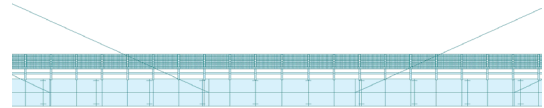


Fig. 16 Enlarged FE model with closed type

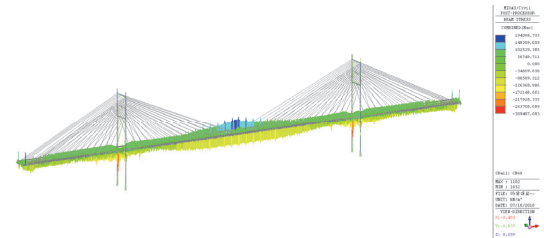


Fig. 17 Stress distr. of bridge with closed type



Fig. 18 Enlarged FE model with hollow type

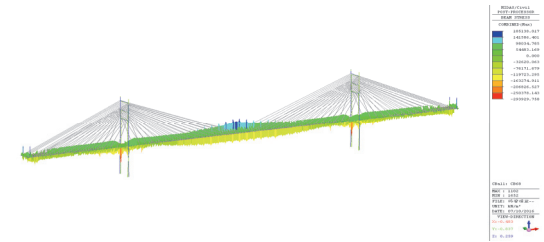


Fig. 19 Stress distr. of bridge with hollow type

3.3 사장교의 안전성 검토

본 절에서는 5가지 인명보호 구조물의 설치에 따른 사장교의 내풍해석을 수행하여 인명보호 구조물의 형태에 따라 강재주형에 발생하는 최대응력을 Fig. 20에 비교하여 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 도로교 시방서의 기본풍속이 40m/sec에서는 모든 구조물이 허용응력보다 작게 나타나고 있지만, 사장교의 설계기준풍속인 68km/sec에서는 밀폐형과 중공형은 허용응력을 초과하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 21에는 사장교의 강재 가로보에서 발생하는 최대응력을 비교하여 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 경우에서 허용응력 이내로 발생함을 알 수 있다.

Fig. 22에는 콘크리트 주탑 가로보에 발생하는 최대응력을 비교하여 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 도로교 시방서의 기본풍속이 40m/sec에서는 모든 구조물이 허용응력보다 작게 나타나

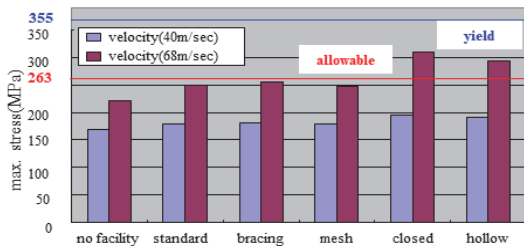


Fig. 20 Max. Stresses on steel main beam

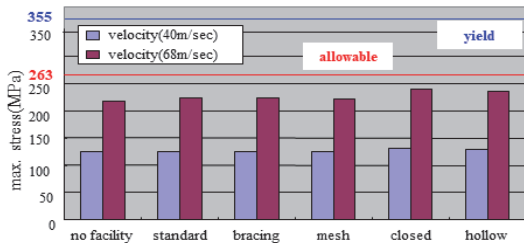


Fig. 21 Max. Stresses on steel floor beam

고 있지만, 사장교의 설계기준풍속인 68km/sec에서는 밀폐형과 중공형은 허용응력을 초과하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 23에는 케이블에 발생하는 최대응력을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 경우에서 케이블에 발생하는 응력은 허용응력 이내로 발생함을 알 수 있다.

전술한 결과로 부터 일반형, 메쉬형과 브레이싱형은 사장교의 내풍안전성을 확보하고 있는 것으로, 밀폐형과 중공형은 내풍안전성이 확보되지 않는 것으로 나타났다. 또한, 내풍안전성을 증가시키는 인명보호 구조물의 순서는 메쉬형, 일반형, 브레이싱형, 중공형과 밀폐형인 것으로 사료된다.

3.4 주요부재의 응력증분

Fig. 24에는 인명보호 구조물 설치에 따른 강재 주형의 응력증분치를 풍속별로 도시하였다. 그림

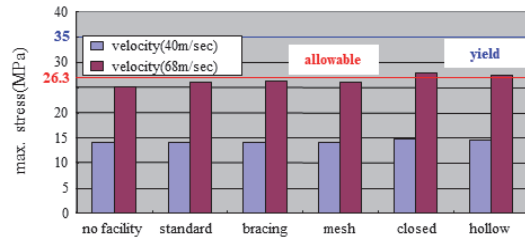


Fig. 22 Max. Stresses on concrete floor beam

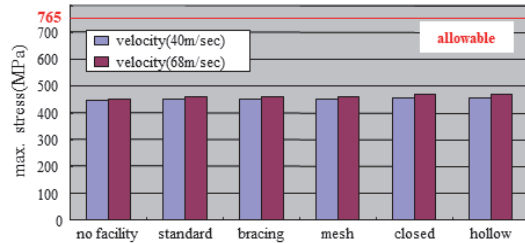


Fig. 23 Max. Stresses on cables

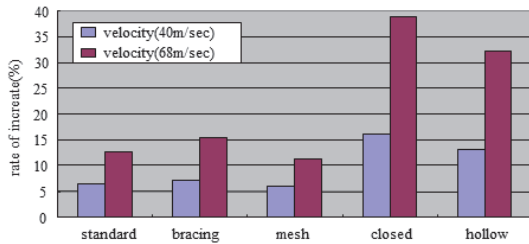


Fig. 24 Stress increments on steel main beam

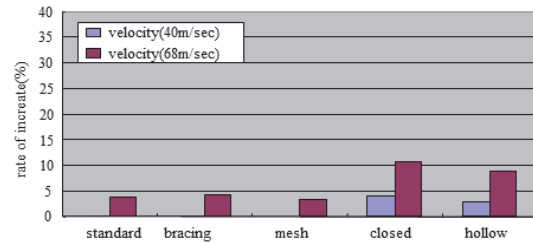


Fig. 26 Stress increments on concrete floor beam

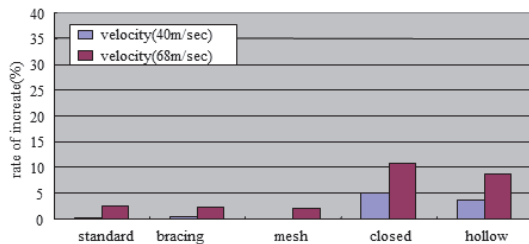


Fig. 25 Stress increments on steel floor beam

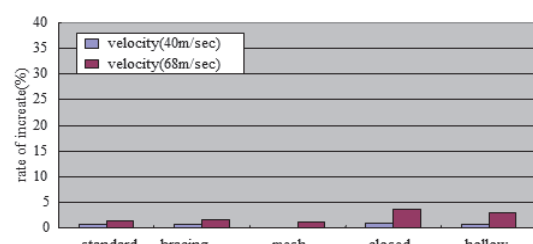


Fig. 27 Stress increments on cable

에서 보는 바와 같이 풍속 40m/sec에서는 최소 5.9%, 최대 16%까지 최대응력이 증가됨을 알 수 있었고, 풍속 68m/sec에서는 최소 11.3%, 최대 39%까지 최대응력이 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 25에는 인명보호 구조물 설치에 따른 강재 가로보의 응력증분치를 풍속별로 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 풍속 40m/sec에서는 최소 0.01%, 최대 5.1%까지 최대응력이 증가됨을 알 수 있었고, 풍속 68m/sec에서는 최소 2.0%, 최대 10.8%까지 최대응력이 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 26에는 인명보호 구조물 설치에 따른 콘크리트 주탑 가로보의 응력증분치를 풍속별로 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 풍속 40m/sec에서는 최소 0.01%, 최대 2.8%까지 최대응력이 증가됨을 알 수 있었고, 풍속 68m/sec에서는 최소 3.3%, 최대 10.6%까지 최대응력이 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 27에는 인명보호 구조물 설치에 따른 케이블의 응력증분치를 풍속별로 도시하였다. 그림에

서 보는 바와 같이 케이블의 응력증분은 다른 부재들에 비하여 매우 미소함을 알 수 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이 인명보호 구조물 설치에 따른 사장교 부재의 최대응력증분은 강재 주형, 콘크리트 주탑 가로보, 강재 가로보와 케이블의 순서로 각각 나타났다. 따라서 인명보호 구조물 설치에 따라 강재 주형이 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 사장교 구간에 설치될 인명보호 구조물에 대한 교량의 내풍안전성을 확보하기 위하여 풍동실험과 유한요소해석을 수행하고, 수행된 결과에 기초하여 내풍저항성이 가장 우수한 인명보호 구조물을 선택하였다. 또한 선택된 인명보호 구조물에 대하여 사장교의 안전성을 검토한 결

과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 일반형, 브레이싱형, 메쉬형, 밀폐형과 중공형의 인명보호 구조물만을 모형화하여 내풍 해석한 결과, 내풍저항성이 가장 우수한 형태는 메쉬형, 일반형, 브레이싱형, 중공형과 밀폐형 순서로 나타났다. 또한 동일한 형태의 인명보호 구조물들은 수직형, 지붕형, 절곡형1과 절곡형2의 순서로 내풍저항성이 크을 알 수 있었다.
2. 사장교 주형에 설치될 인명보호 구조물의 형태로 메쉬형, 일반형과 브레이싱형은 기본풍속 40m/sec와 설계기준풍속 68.0m/sec에 대하여 모두 내풍안전성이 확보되어 있는 것으로 나타났지만, 중공형과 밀폐형은 설계풍속 68m/sec에서 내풍안전성이 확보되어 있지 않는 것으로 나타났다. 따라서 인명보호 구조물의 형태로 메쉬형, 일반형과 브레이싱형을 제안한다.
3. 인명보호 구조물 설치에 따른 사장교 부재의 최대응력증분은 강재 주형, 콘크리트 주탑 가로보, 강재 가로보와 케이블의 순서로 각각 나타났다. 따라서 인명보호 구조물 설치에 따라 강재 주형이 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 결과임.

참고문헌

- [1] 허택녕, “풍동실험을 통한 사장교의 내풍 안전성 검토,” 한국산업융합학회 논문집, 제23권, 제4호, pp 636-638, (2020).
- [2] 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, pp. 2.12-2.18, (2010).
- [3] 변상균, 3차원 사장교의 효율적인 유지관리를 위한 관리한계 기준의 설정, 창원대학교 대학원, 석사학위논문, pp. 21-28, (2009).
- [4] 김종일, 재하실험을 통한 사장교의 3차원 동적 거동에 관한 연구, 창원대학교 산업대학원, 석사학위논문, pp. 9-29, (2008).

(접수: 2022.06.14. 수정: 2022.07.01. 게재확정: 2022.07.07.)