

강성개폐식 대공간 지붕의 개폐 관리중속 사례 분석

A Case Study of Retraction Controlled Wind Velocity on the Steel Retractable Roof of Large Span

송진영*
 Song, Jin-Young

윤성원**
 Yoon, Sung-Won

Abstract

The retractable roof structures have actions of various types of loads and external forces depending on the retraction and operation conditions of the roof in terms of efficiency of control and maintenance as the aspect of structural plan. In particular, there is a need for studies on the establishment of retraction controlled wind velocity to maintain the stable control and usability of roof structure against strong winds or sudden gusts during the retraction of the roof. In this paper, it was intended to provide basic materials for the development of guidelines on the operation and maintenance of domestic retractable buildings with large space by analyzing the factors affecting the retraction controlled wind velocity for the overseas stadiums with the large spatial retractable roof structures where the sliding system was applied on the steel retractable systems. As a result, the controlled wind velocity tends to decrease as the retractable roof area increases. On the other hand, the controlled wind velocity tends to increase as the retraction time increases. In addition, in the space-grid roof structures, the spherical roof structures type showed the average controlled wind velocity of 10m/sec lower than that of 17.3m/sec for curved-roof structure type, and in the curved-roof structure type, the truss roof structure showed the average controlled wind velocity of 8.9m/sec which is lower than that of 17.3m/sec for the space for the space-grid roof structure.

Keywords : Steel retractable structure, Sliding system, Retraction controlled wind velocity, Wind load

1. 서론

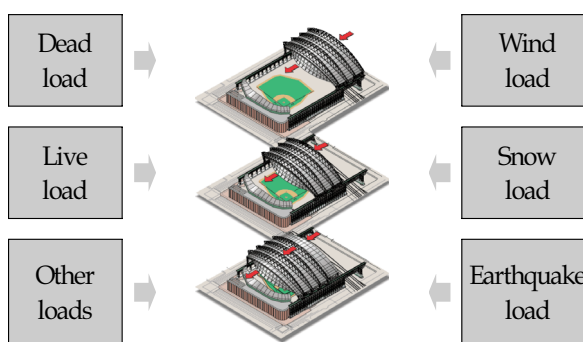
개폐식 지붕 구조는 로마인에 의해 고대부터 사용되었다¹⁾. 세계 최초의 개폐식 지붕 경기장인 Sky Dome이 1989년 완공된 이후,²⁾ 기후변화에 대처할 수 있고 에너지 절감 및 친환경적 공간 창출을 위한 개폐식 대공간 건축물의 수요가 증가하고 있다³⁾.

Aspects for architectural planning and design	- Purpose of use and user's requirements - Environment and site conditions - Scale and economy
Aspects for structural plan	- Safety and stability due to roof retraction - Frequency and speed of retraction - Efficiency of control and maintenance

〈Fig. 1〉 Considerations of retractable roofs⁴⁾

* 학생회원, 서울과학기술대학교 건축과, 박사과정
 Dept. of Architecture, Seoul National University of Science and Technology
 ** 교신저자, 정희원, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
 School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology
 Tel: 02-970-6587 Fax: 02-979-6563
 E-mail: swyoon@seoultech.ac.kr

개폐식 지붕은 개방형 지붕 및 폐쇄형 지붕의 건축물로 사용할 수 있도록 넓은 공간을 짧은 시간 내에 이동하는 구조이다¹⁾. <Fig. 1>과 같은 건축 계획의 측면과 구조 계획의 측면을 고려해야 한다⁴⁾. 구조적 측면인 제어 및 유지관리의 효율성 부분에서 지붕의 개방 상태, 폐쇄 상태, 반 개방 상태 및 작동 상태에 따라 <Fig. 2>와 같은 다양한 종류의 하중과 외부의 힘이 평가되어야 한다⁵⁾.



〈Fig. 2〉 Loads and external forces^{1),6)}

또한, 기본 설계와 개폐 방식에 따라 구조물이 저

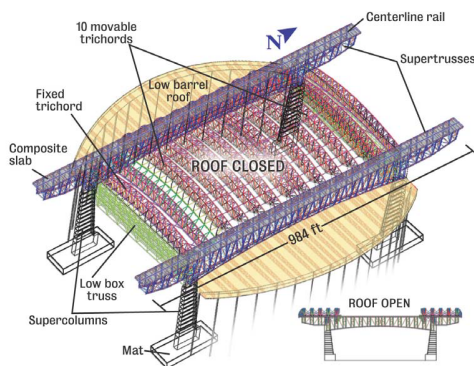
항하는 최대 풍하중이 다르기 때문에 개폐 관리는 설계 조건을 충분히 인식한 상태에서 수행되어야 한다⁵⁾. 특히, 풍하중과 관련하여 기상 정보에 의한 예측 관리 및 지붕 근처에 설치된 풍력계를 이용한 측정 관리가 중요하다⁵⁾.

따라서 지붕의 개폐 시 강풍 및 갑작스러운 돌풍에 대한 지붕 구조물의 안정적인 제어 및 사용성을 유지하기 위한 개폐 관리풍속 설정에 대한 연구가 필요하다.

이에 본 논문에서는 강성개폐시스템 중 Sliding system이 적용된 해외 대공간 개폐식 지붕 구조 경기장의 개폐 관리풍속 설정에 영향을 주는 요인을 분석하여, 국내 개폐식 대공간 건축물의 운영 및 유지관리의 가이드라인 개발에 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 개폐식 지붕 구조

개폐식 지붕 구조는 지붕을 가동하여 건축적으로 사용 형태가 개방 상태, 폐쇄 상태 또는 반 개방 상태로 사용하는 것으로 지금까지 건축기준법상의 규정이 없다⁷⁾. 일반적인 지붕 구조와 비교하면, 주요한 특징은 안정적인 개폐를 위해 전체 지붕 표면에 발생하는 응력에 대비하여 설계되어야 한다^{5),8)}.



〈Fig. 3〉 Reliant stadium structural system⁹⁾

또한, 각각의 지붕은 개별적으로 동작할 수 있도록 설계한다⁸⁾. 하지만 외부 환경으로부터 안전한 실내공간을 만들기 위해서는 단일 지붕으로서 역할을 해야 한다⁸⁾.

3. 개폐식 지붕의 풍하중

개폐식 지붕 구조에 작용하는 하중과 외력은 개폐 상태, 반 개방 상태와 작동 상태에 따른 적절한 하중을 산정해야 한다⁵⁾. 개폐식 지붕 구조에 작용하는 외력은 풍하중, 적설하중, 지진하중이 있다^{5),8)}. 그러나 일부 국가에서는 적설하중과 지진하중을 고려하지 않아도 된다⁵⁾. <Table 1>은 개폐식 지붕의 풍하중 산정에 대한 내용이다.

〈Table 1〉 Wind load determination for the retractable roof⁵⁾

Classification	Detail
Wind load determination	<ul style="list-style-type: none"> • Wind loads should be set appropriately for each set of conditions, based on the reaction conditions for both open and closed states. • The dynamic wind pressure design should be determined corresponding to the environmental and ground surface conditions of the building site, the height and size of the building, and service life etc. • The wind pressure design coefficients should be determined for both open and closed states, using wind pressure coefficients obtained from wind tunnel tests.
	<ul style="list-style-type: none"> • For a retractable roof with shape similar to that of a previous example, the wind pressure coefficients given in previous data can be used. • For wind load to be applied on the retractable roof in the running state, the relatively frequently occurring wind should be properly assessed, and the wind load should be calculated using the dynamic wind pressure. • Where the retractable roof is closed during a storm, the wind load applied on the retractable roof in the open state and semi-open fixed state should be calculated using dynamic wind pressure by adequately determining strong winds which occur relatively frequently.

4. 개폐식 지붕의 개폐 관리풍속

개폐식 지붕의 개폐 시 설계풍속과 관리풍속은 다르기 때문에 설계풍속을 관리풍속에 적용하는 것은 위험하다⁷⁾.

〈Table 2〉 Examples of retraction controlled wind velocity for retractable roof structures in Japan^{5),7)}

Name of building	Open state (m/sec)	Design value during running (m/sec)
Ball dome	10 (Average)	20 (Inst.)
Tyoto Citizen's Amenity Plaza	13.5 (Average)	15 (Average)
Mukogawa Gakuin Swimming Pool	15 (Inst.)	15 (Inst.)
Shima Spain Village Open Air Theater	18 (Average)	20 (Average)

〈Table 2〉는 일본 개폐식 지붕 건축물의 예이다. 개폐 중 설계풍속(평균 및 순간풍속) 15~20m/sec에 관한 개방 상태의 관리풍속(평균 및 순간풍속)을 10~18m/sec로 적용하고 있다.

〈Table 3〉 Opening and closing control in strong wind conditions⁵⁾

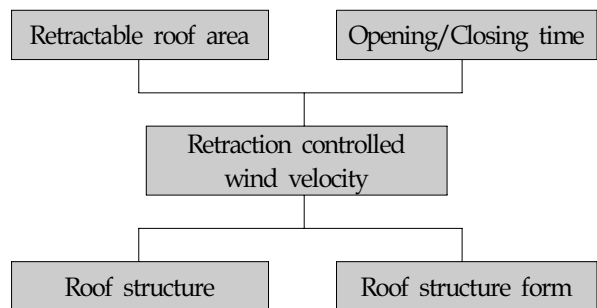
Classification	Detail
Closed state	<ul style="list-style-type: none"> The roof is closed when wind velocity exceeds a certain value. This plan is selected when the opening and closing method and open shape of the structure are disadvantageous against wind load, or when the interior should not be subjected to wind and rain.
Open state	<ul style="list-style-type: none"> The interior structure will be subjected to strong wind and rain. This plan is selected when the closed-state structure is disadvantageous for resisting strong wind or storms, for economic reasons or in cases where the structure should be open because the wind velocity exceeds a predetermined value.

〈Table 3〉은 강풍 상태에 대한 개폐 제어 내용이다. 강풍은 태풍 외에 계절풍, 회오리바람(선풍), 돌풍 등의 종류가 있다⁷⁾. 구조물의 피해는 전체적인 붕괴, 영구 변형, 기능 장애, 국부적인 파손 및 형상 변화 등이 발생한다¹⁰⁾.

개폐식 지붕의 안전한 개폐 제어를 위한 관리풍속은 경계풍속을 설정하고 풍속 단계를 넘으면 원칙적으로 개폐식 지붕을 설계상 안전한 위치에 이동시켜 정지 및 고정한다⁷⁾. 또한, 운영 및 관리를 위한 개폐 한계풍속을 설정하고 풍속 단계를 넘으면 개폐 조작을 하지 않도록 한다⁷⁾.

5. 개폐 관리풍속 사례 분석

해외 대공간 개폐식 경기장(수용인원 10,000명 이상)의 강성개폐식 중 Sliding system을 적용된 8동에 관한 개폐 관리풍속에 영향을 주는 요인으로 〈Fig. 4〉와 같이 분류하여 분석하였다.



〈Fig. 4〉 Examples of analytic factors






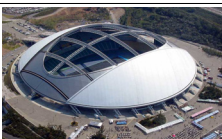

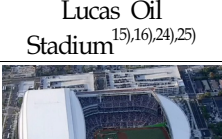
〈Table 4〉는 풍속 단위 환산표이다. 미국과 캐나다의 풍속 단위(Km/h, mph)를 우리나라 및 일본의 10분 평균 풍속 m/sec 단위로 환산하였다.

〈Table 4〉 Unit conversion table of wind velocity¹⁰⁾

m/s	km/h	mph
1	3.600	2.237

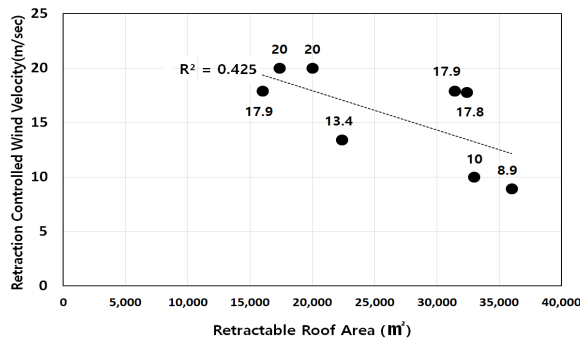
분석 대상인 대공간 경기장은 준공 연도순으로 〈Table 5〉에 정리하였다.

<Table 5> Table data of retractable roof structures

Name of stadium	Completion year	Location	Retraction controlled wind velocity (m/sec)	Retractable roof area (m ²)	Opening /Closing time (min.)	Roof structure	Structure form
 Rogers Centre ^{5),11),12),13),14)}	1989	Canada	17.8	32,374	20	Space grid	Curved
 Ariake Coliseum ^{5),15),16)}	1991	Japan	20	17,366	17.5	Space grid	Curved
 Fukuoka Dome ^{5),15),16),17)}	1993	Japan	10	33,000	20	Space grid	Spherical
 Chase Field ^{15),16),18),19)}	1998	U.S.A.	13.4	22,400	4	Space grid	Curved
 Safeco Field ^{15),16),20),21),22)}	1999	U.S.A.	8.9	36,000	10	Truss	Curved
 Oita Big Eye Stadium ^{5),15),16),23)}	2001	Japan	20	20,000	20	Truss	Spherical
 Lucas Oil Stadium ^{15),16),24),25)}	2008	U.S.A.	17.9	16,000	9	Truss	Sloping
 Marlins Park ²⁶⁻²⁸⁾	2012	U.S.A.	17.9	31,401	13	Space grid	Curved

5.1 개폐 지붕 면적과 관리풍속 관계

개폐 지붕 면적(Retractable roof area)과 관리풍속(Retraction controlled wind velocity)의 관계는 <Fig. 5>와 같다. 개폐 지붕 면적이 증가함에 따라 관리풍속이 낮아지는 경향을 보이며, 개폐 지붕 면적과 관리풍속의 상관계수 R^2 은 0.425로서, 개폐 지붕 면적과 관리풍속 사이에는 약간의 상관성을 보이고 있다.



<Fig. 5> Retractable roof area - Retraction controlled wind velocity

개폐 지붕 면적 3,000~4,000m²의 평균 관리풍속은 13.7m/sec로 개폐 지붕 면적 1,500~2,500m²의 평균 관리풍속 17.8m/sec보다 4.1m/sec가 낮다.

이유는 풍속에 따른 개폐 지붕 구조물의 면적 증가는 개폐 비용 절감 효과가 감소하기 때문이다⁵⁾.

5.2 개폐 시간과 관리풍속 관계

개폐 시간(Opening/Closing time)과 관리풍속(Retraction controlled wind velocity)의 관계는 <Fig. 6>과 같다. 개폐 시간이 증가함에 따라 관리풍속이 높아지는 경향을 보이며, 개폐 시간과 관리풍속의 상관계수 R^2 은 0.677로서, 개폐 시간과 관리풍속 사이에는 강한 상관성을 보이고 있다. 식 (1)과 같은 선형식으로 수식화 된다.

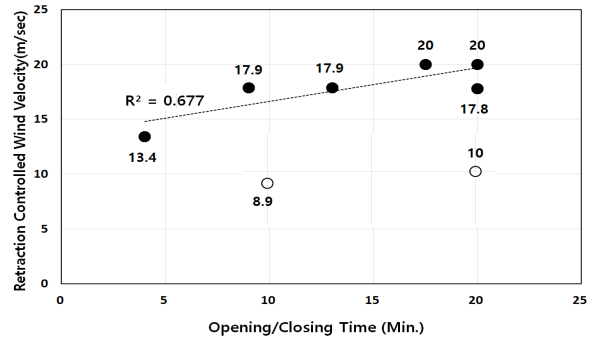
$$W_v = 0.306R_T + 13.575 \quad (1)$$

W_v : Retraction controlled wind velocity

R_t : Opening/Closing time

<Fig. 6>의 “○”로 표시된 개폐식 지붕은 통계치

리에서 제외된 대상으로서, 바람 등의 기상 조건에 의해 평균 개폐 시간이 10~20분을 적용하고 있으며, 8.9m/sec의 풍속에서 개폐 시간이 10분 걸리는 Safeco Field²¹⁾와 바람에 의한 내부 전시물 등의 이탈을 방지하기 위해 10m/sec의 풍속에서 지붕을 폐쇄하는 Fukuoka Dome⁵⁾을 제외하였다.

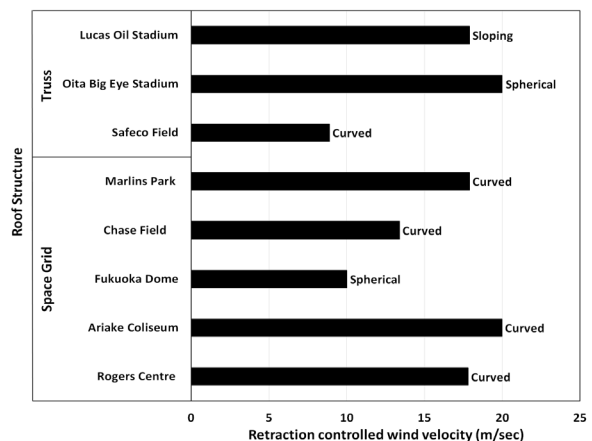


<Fig. 6> Opening/Closing time - Retraction controlled wind velocity

풍속이 낮은 경우 바람에 의한 지붕 구조물에 가해지는 충격이 작기 때문에 짧은 시간 동안 안정적인 지붕의 개폐가 이루어진다. 반면 풍속이 높은 경우 강풍으로 인한 충격으로 진동 등의 현상 발생에 대해 가동부 지붕의 이탈 방지 및 안정적인 제어와 사용성 향상을 위해 개폐 시간이 증가한다⁵⁾.

5.3 지붕 구조와 관리풍속 관계

지붕 구조(Roof structure)와 관리풍속(Retraction controlled wind velocity)의 관계는 <Fig. 7>과 같다.



<Fig. 7> Roof structure - Retraction controlled wind velocity

Truss 지붕 구조에서 관리풍속이 상대적으로 낮은 Safeco Field를 제외한 평균 관리풍속은 19m/sec이며, Space grid 지붕 구조에서 Fukuoka Dome을 제외한 평균 관리풍속은 17.3m/sec이다.

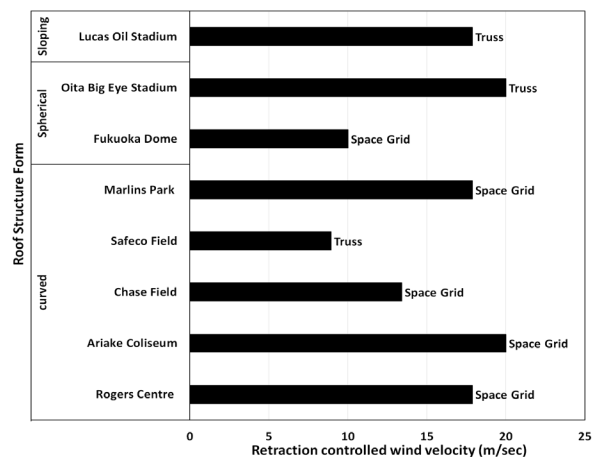
Space grid 지붕 구조에서 Spherical 지붕 구조 형태(Roof structure form)인 Fukuoka Dome이 Curved 지붕 구조 형태의 평균 관리풍속 17.3m/sec보다 낮은 10m/sec를 나타내고 있다.

<Fig. 7> 및 <Table 6>을 보면 같은 지붕 구조에서 지붕 구조 형태가 관리풍속 설정에 영향을 주고 있다.

<Table 6> Structure form of space grid structure

Name of stadium	Retraction controlled wind velocity(m/sec)	Roof structure form
Rogers Centre	17.8	Curved
Ariake Coliseum	20	Curved
Fukuoka Dome	10	Spherical
Chase Field	13.4	Curved
Marlins Park	17.9	Curved

5.4 지붕 구조 형태와 관리풍속 관계



<Fig. 8> Roof structure form - Retraction controlled wind velocity

지붕 구조 형태(Roof structure form)와 관리풍속 (Retraction controlled wind velocity) 관계는 <Fig. 8>과 같다. Curved 지붕 구조 형태에서 Safeco Field를 제외한 평균 관리풍속은 17.3m/sec이다.

Curved 지붕 구조 형태에서 Truss 지붕 구조 (Roof structure)인 Safeco Field가 Space grid 지붕 구조의 평균 관리풍속 17.3m/sec보다 낮은 8.9m/sec를 나타내고 있다.

<Fig. 8> 및 <Table 7>을 보면 같은 지붕 구조 형태에서 지붕 구조가 관리풍속 설정에 영향을 주고 있다.

<Table 7> Roof structure of curved roof structure form

Name of stadium	Retraction controlled wind velocity(m/sec)	Roof structure form
Rogers Centre	17.8	Space grid
Ariake Coliseum	20	Space grid
Chase Field	13.4	Space grid
Safeco Field	8.94	Truss
Marlins Park	17.9	Space grid

6. 결론

강성개폐시스템 중 Sliding system이 적용된 해외 대공간 개폐식 지붕 구조 경기장의 개폐 관리풍속 설정에 영향을 주는 요인을 분석하였다.

1) 개폐 지붕 면적(Retractable roof area)과 관리풍속(Retraction controlled wind velocity)의 관계는 개폐 지붕 면적이 증가함에 따라 관리풍속이 낮아지는 경향을 보이고 있다.

2) 개폐 시간(Opening/Closing time)과 관리풍속 (Retraction controlled wind velocity)의 관계는 개폐 시간이 증가함에 따라 관리풍속이 높아지는 경향을 보이고 있다.

3) Space grid 지붕 구조(Roof structure)에서 Spherical 지붕 구조 형태(Roof structure form)가

Curved 지붕 구조 형태의 평균 관리풍속 17.3m/sec 보다 낮은 10m/sec를 나타내고 있다. 또한, Curved 지붕 구조 형태에서 Truss 지붕 구조(Roof structure)가 Space grid 지붕 구조의 평균 관리풍속 17.3m/sec보다 낮은 8.9m/sec를 나타내고 있다. 이에 관리풍속 설정에 있어서 지붕 구조와 지붕 구조 형태가 연관성이 있다는 것을 확인하였다.

이 논문에서는 해외 개폐식 지붕의 개폐 운영에 대한 관리풍속 자료가 부족한 관계로 추후 강성개폐식 및 연성개폐식의 다양한 개폐 방식에 대한 개폐 관리풍속 자료 조사를 통한 요인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(18AUDP-B100343-04) 및 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2016R1A2B2014064)을 받아 수행되었습니다.

References

1. Patidar, S., & Gandhe, V., "Typology of Retractable Roof Structure", International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, Vol.3, No.3, pp.556~560, 2017
2. Frazer, A. H., "Design Considerations for Retractable-Roof Stadia", Massachusetts Institute of Technology, Theses for Master's Degree in Department of Civil and Environmental Engineering, 2005
3. Kang, J. W., "(Special Issue) Trend of Large spatial Structures Technology by Internal and External", Journal of The Korea Institute of Building Construction, Vol.16, No.4, pp.16~23, 2016
4. Park, S. W., & Choi, C. K., "Case Study on Opening-system of the Retractable Roof Structures", Proceedings of KASS Symposium-Spring 2007, Vol.4, No.1, pp.37~43, 2007
5. Ishii, K., "Structural Design of Retractable Roof Structures", WIT Press, pp.3~183, 2000
6. http://old.seattletimes.com/sports/allstar/safeco/retr_roof.html
7. Kim, J. Y., "Retractable Roof Design", GOOMI SEOGWAN, pp.11~125, 2012
8. Smith, J. K., "Current Technologies and Trends of Retractable Roofs", University of Washington, Theses for Master's Degree in Department of Civil and Environmental Engineering, 2003
9. Griffis, L. G., Axmann G., Patel, V. B., Waggoner, M. C., & Vinson J., "High-Strength Steel in the Long-Span Retractable Roof of Reliant Stadium", 2003 NASCC Proceedings, Baltimore, Maryland, pp.1~9, 2003
10. The Wind Engineering Institute of Korea, The Korean Structural Engineers Association, "Wind-Resistant Engineering", KIMOONDANG, 2010
11. https://en.wikipedia.org/wiki/Rogers_Centre
12. <http://www.walterp Moore.com/projects/rogers-centre-roof-study>
13. http://toronto.bluejays.mlb.com/tor/ballpark/roof_operation_guidelines/index.jsp
14. <https://seatingchartview.com/rogers-centre/>
15. Goudarzi, F., Aseman, G. D., & Maghareh, M. R., "Statistical Analysis of Sport Stadiums with Retractable Roof Systems", Scientific Journal of Architecture, Vol.3, Iss.4, PP.65~72, 2013
16. Masubuchi, M., "Conceptual and Structural Design of Adaptive Membrane Structures with Spoked Wheel Principle - Folding to the Perimeter", Technischen Universität Berlin, pp.198~210, 2013
17. <https://www.maeda.co.jp/english/history.html>
18. <https://groundrules.mlb.com/diamondbacks/index.html>

19. <http://www.thisgreatgame.com/ballparks-chase-field.html>
20. <http://seattle.mariners.mlb.com/sea/ballpark/information/index.jsp?content=facts>
21. Miller, B. J., "Structural Roof Systems for Athletic Stadia", Master's Degree Thesis of Civil and Environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, 2001
22. <http://www.gwlocphoto.com/mlb-stadium-safeco-field-century-link-stadium/>
23. <http://blog.daum.net/bctotsh/15967068>
24. <http://www.lucasoilstadium.com/about.aspx>
25. https://aedesign.wordpress.com/2010/09/02/lucas-oil-stadium-indianapolis-indiana/lucas_oil_stadium/
26. <https://www.pinterest.co.kr/pin/437623288770132666/>
27. http://miami.marlins.mlb.com/mia/ballpark/retractable_roof_facts.jsp
28. <http://www.stadia-magazine.com/articles.php?ArticleID=334>

- Received : December 15, 2017
- Revised : January 12, 2018
- Accepted : January 12, 2018