

2개의 볼트를 가지는 PFRP 볼트연결부의 볼트배치에 따른 강도평가

이영근¹ · 김선희² · 원용석² · 천진욱² · 신광열³ · 윤순종⁴

홍익대학교 토목공학과 박사후연구원¹, 홍익대학교 토목공학과 박사과정², 홍익대학교 토목공학과 겸임교수³,
홍익대학교 토목공학과 교수⁴

Strength Evaluation of Bolt Arrangement in PFRP Bolted Connection with 2 Bolts

Lee, Young-Geun¹ · Kim, Sun-Hee² · Won, Yong-Seok² · Cheon, Jin-Uk² · Shin, Kwang-Yeoul³
· Yoon, Soon-Jong⁴

¹Post-doctoral Research Fellow, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

²PhD. Student, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

³Adjunct Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

⁴Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Abstract: Fiber reinforced plastic (FRP) structural shapes are readily available in civil engineering applications. Among many manufacturing techniques used for FRP structural shapes, pultrusion process is one of the most widely used techniques in civil engineering applications. Pultrusion is a manufacturing process for producing continuous lengths of reinforced polymeric plastic structural shapes with constant cross-section. Pultruded composites are attractive for structural applications because of their continuous mass production with excellent mechanical properties. This paper presents the results of investigations pertaining to the bolted connection with two bolts for the pultruded FRP (PFRP) structural members. PFRP bolted connection tests were conducted with end distance to bolt diameter ratio (e_1/d_b) and two types of bolt pattern such as horizontal (Pattern A) and vertical arrangement (Pattern B). As a result, it is found that the e_1/d_b is recommended as the ratio of 4. In addition, it is also found that the bearing strengths at failure of the Pattern A and Pattern B have a similar value.

Key Words: Pultruded FRP, Bolted connection, Arrangement, Experiment, Strength

1. 서론

인발성형복합재료(Pultruded fiber reinforced polymeric plastic, PFRP)는 강재의 1/4의 단위중량을 가지고 있어 경량성이 우수하며, 단위중량당 강도와 강성이 우수하고, 부식에 대한 저항성이 매우 뛰어나다(Hollaway, 2010; Lee et al., 2010-a). 이러한 장점을 가진 PFRP 재료를 토목 구조물에 활용하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 건설분야에

PFRP를 활용하기 위해서는 2가지 문제가 해결되어야 한다. 첫 번째는 PFRP에 대한 설계기준이 정립되지 않았다는 것이다. 이 문제를 해결하기 위하여 다양한 연구자들이 많은 연구를 수행하였으며, 그 결과로써 2010년 ACMA (American Composites Manufacturers Association)에서 연구를 수행하여 ASCE (American Society of Civil Engineers)에 “Pre-Standard for Load and Resistance Factor of Design of Pultruded Fiber Reinforced Polymer Structures (2010)”를 제출하였으나, 아직 최종적으로 기준으로 정해지지 않는 상황이다. 또 하나의 문

주요어: PFRP, 하중저항계수설계, 국부좌굴, 실험, 정밀해법

Corresponding author: Yoon, Soon-Jong

Department of Civil Engineering, Hongik University, 72-1 Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 172-732, Korea.

Tel: +82-2-3141-0774, Fax: +82-2-3141-0774, E-mail: sjyoon@hongik.ac.kr

투고일: 2014년 9월 2일 / 수정일: 2014년 9월 12일 / 게재확정일: 2014년 9월 12일

제점은 볼트연결부의 강도의 불확실성이다. 건설분야에서 볼트연결은 필수적인 요소이다(Lee et al., 2011). 그러나 볼트연결부의 강도는 볼트의 수, 볼트의 배치, 연결부의 기하학적 치수 등 다양한 변수에 의하여 결정된다. 이렇게 다양한 변수는 정확한 강도를 추정하는데 있어서 어려움을 주는 요인이다(Lee, 2013).

이 연구에서는 2개의 볼트를 사용한 PFRP 겹침이음부에 대하여 실험적 연구를 수행하였고 이를 분석하였다. 실험은 볼트 2개를 가로로 배치한 형태와 세로로 배치한 형태의 실험시편에 대해서 실험이 수행되었으며, 추가적으로 각 배열에 따른 볼트의 연단거리를 변경하여 실험을 수행하였다. 최종적으로 볼트배열과 연단거리의 영향에 대하여 분석하였다.

2. PFRP 볼트연결부 실험

2.1 PFRP 구조용 부재

실험에 사용된 PFRP 구조용 부재는 국내 PFRP 제조사에서 생산되었으며, ㄷ형 부재로써 유리섬유(E-glass fiber)와 폴리에스터수지(Polyester resin)로 구성된 재료이다. 부재의 섬유배치 형태와 부재의 형태를 Fig. 1에 나타내었다.

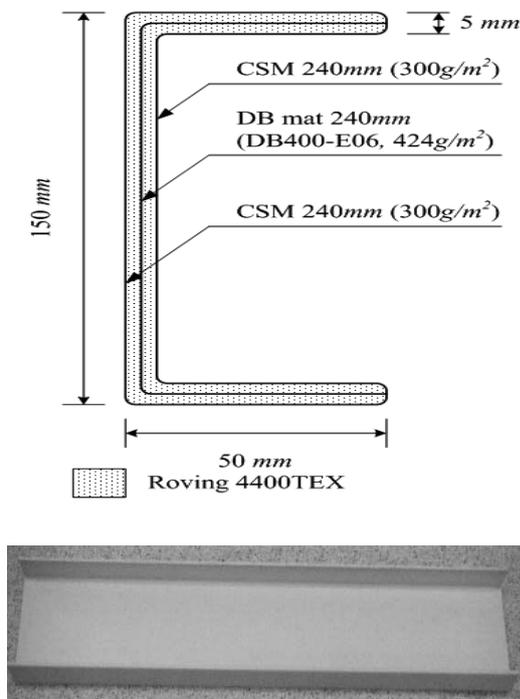


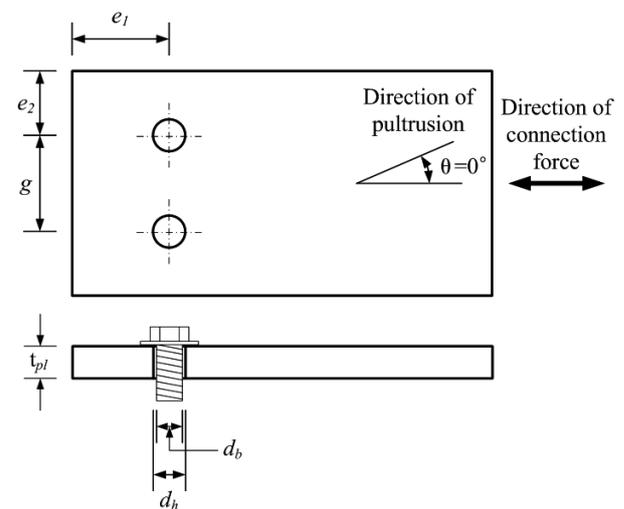
Fig. 1 Fiber Orientations and Cross Section of PFRP Structural Members (Lee et al., 2010-b; Lee, 2013)

2.2 PFRP 볼트연결부 실험 변수

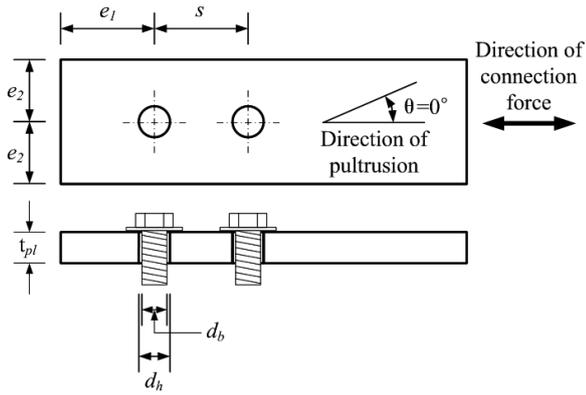
PFRP 볼트연결부 실험에 사용된 변수는 볼트의 배치 형태(Pattern A & Pattern B)와 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e_1/d_b)로 결정하였다. 이외의 기하학적 변수는 실험에 영향을 주지 않기 위하여 Bank(2006)가 제시한 추천값 이상을 확보하도록 설정하였다. 사용된 볼트는 M10에 해당하는 스테인리스 볼트를 사용하였으며 동일한 재질을 가지는 평와셔와 너트를 사용하였다. 실험에 시편의 구성과 각각의 치수를 Table 1에 나타내었으며, 실험시편의 기본적인 형태와 변수를 Fig. 1에 나타내었다. 각각의 시편은 변수별로 5개씩 제작하였으며, 총 30개의 시편을 제작하였다.

Table 1. Dimension of Test Specimens

Specimen Designation	Pattern	Geometric Parameters (mm)						
		e_1	e_2	g	s	t_{pl}	d_b	d_h
C-A-e3	A	30	20	40	-	5	10	12
C-A-e4		40						
C-A-e5		50						
C-B-e3	B	30	25	-	40	5	10	12
C-B-e4		40						
C-B-e5		50						



(a) Pattern A



(b) Pattern B

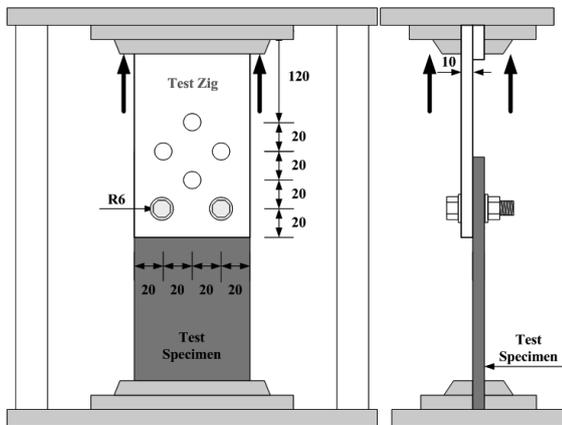
Fig. 2 Geometric Parameters of Connection Specimens

2.3 PFRP 볼트연결부 실험

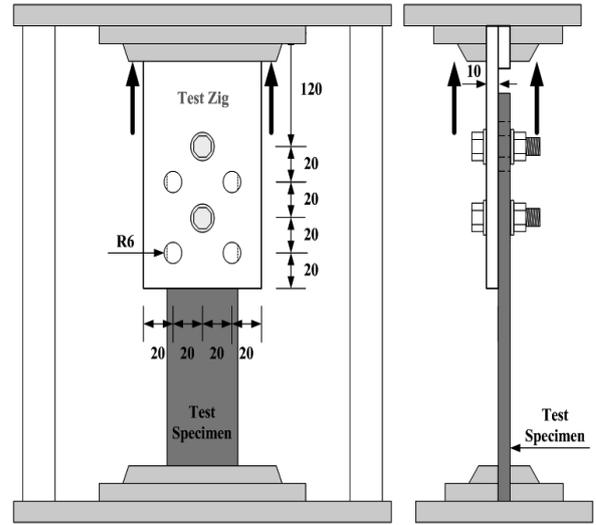
PFRP 볼트연결부 실험은 홍익대학교 구조연구실에서 수행되었으며, 1,000kN 용량의 만능재료시험기 (UTM)를 이용하였다. 하중은 변위제어방식으로 1mm/min의 속도로 재하하였다. 실험은 Single Lap-Joint의 형태로 수행되었으며, 실험에 사용된 지그는 스테인리스 강재로 Fig. 3와 같이 제작하였다. 시편을 설치할 때에는 편심에 의한 모멘트가 발생하지 않도록 지그의 위치를 조정하였다. 실험의 개요를 Fig. 4에 나타내었으며, 실험이 수행된 모습을 Fig. 5에 나타내었다.



Fig. 3 Test Zig (Lee, 2009)

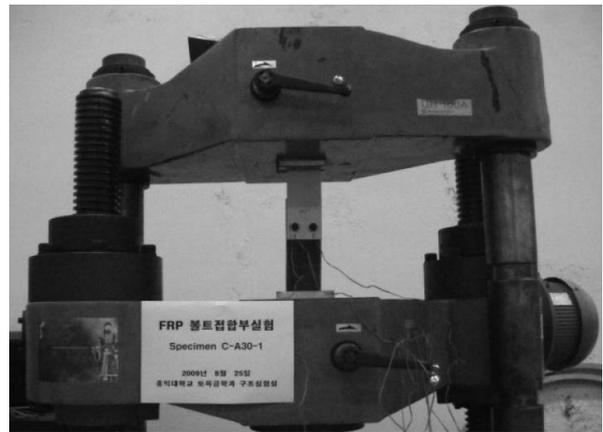


(a) Pattern A



(b) Pattern B

Fig. 4 Schematic View



(a) Pattern A



(b) Pattern B

Fig. 5 Test Set-up

3. PFRP 볼트연결부 실험 결과 및 분석

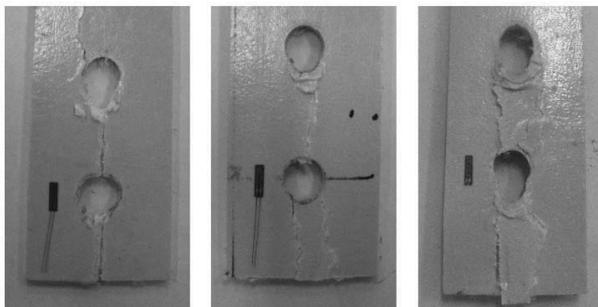
PFRP 볼트연결부 실험을 수행하여 파괴하중, 파괴모드를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 또한 파괴된 시편 중 대표적인 시편의 파괴형상을 Fig. 6에 나타내었다.

4. PFRP 볼트연결부 실험 결과분석

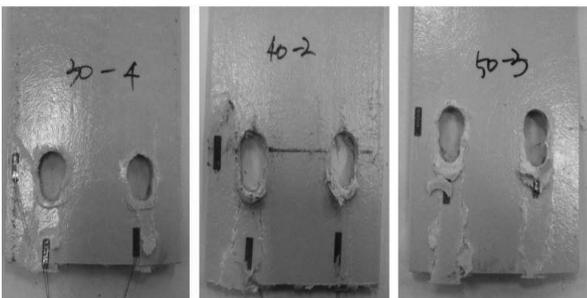
4.1 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e/d_b)에 따른 영향

볼트직경에 대한 연단거리의 비(e/d_b)의 변화에 따른 지압응력의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 시편의 지압응력은 볼트의 배열과 상관없이 e/d_b 가 증가함에 따라 파괴하중이 증가되며, 그 증가폭은 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

파괴모드는 e/d_b 가 3인 시편의 경우는 Pattern A와 Pattern B 모두에서 일부 시편이 지압파괴 없이 전단파괴가 발생되었으나, e/d_b 가 4 이상인 시편은 모두 베어링파괴 모드가 먼저 발생한 후 최종적으로 전단파괴가 발생하였다.



(a) Pattern A



(b) Pattern B

Fig. 6 Failure Mode of Specimens

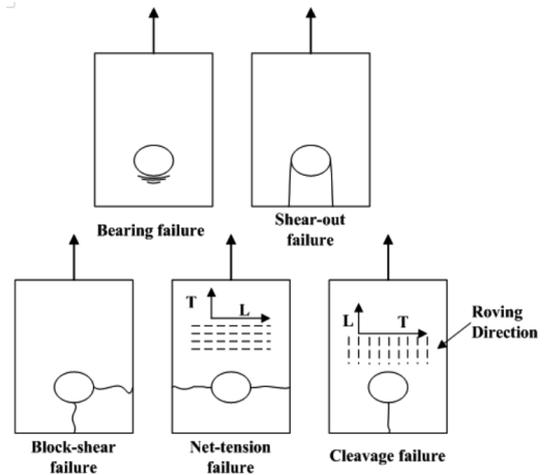
Table 2. Test Result of the Connection Test

Specimen Designation	Failure Load (kN)	Average Ultimate Load (kN)	Dominant Failure Mode
C-A-e3	1	20.00	B-S
	2	21.20	B-S
	3	19.94	S
	4	25.07	B-S
	5	25.27	B
C-A-e4	1	24.64	B
	2	28.57	B-S
	3	24.75	B-S
	4	29.42	B
	5	27.95	B-S
C-A-e5	1	30.87	B-S
	2	24.57	B-S
	3	29.47	B-S
	4	30.89	B-S
	5	26.12	B-S
C-B-e3	1	12.16	B-S
	2	21.64	S
	3	23.70	B-C
	4	19.13	B-C
	5	20.17	B-S
C-B-e4	1	25.59	B-S
	2	26.19	B-S
	3	27.08	B-C
	4	23.60	B-S
	5	26.58	B-S
C-B-e5	1	26.17	B
	2	27.82	B-S
	3	26.51	B-S
	4	25.49	B-S
	5	25.00	B-S

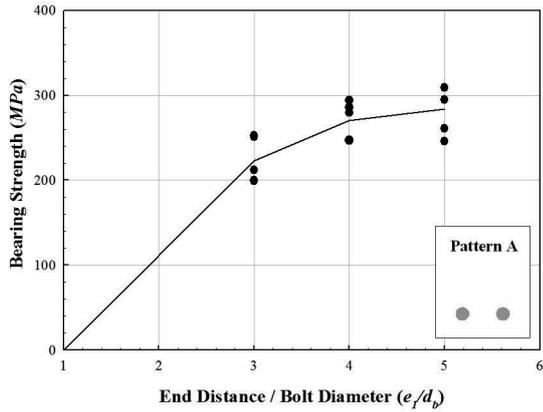
<Failure mode>

Net Tension (NT), Shear-out (S), Bearing (B), Cleavage(C), Cleavage-Tension (CT)

B-S : Bearing Failure → Shear-out Failure



(Lee et al., 2010)



(a) Pattern A

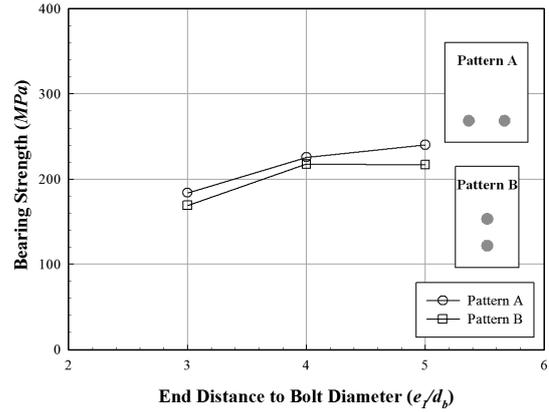
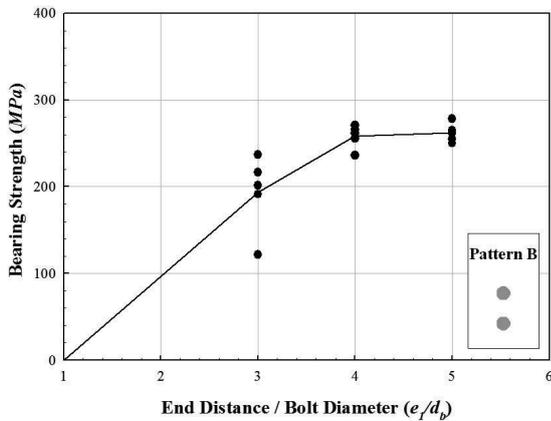


Fig. 8. Effect of Ratio e_1/d_b



(b) Pattern B

Fig. 7. Effect of Ratio e_1/d_b

4.2 볼트배열에 따른 영향

Pattern A와 Pattern B의 두가지 볼트배열에 따른 지압응력의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 두가지의 볼트배열에 따른 지압응력은 거의 유사한 값과 경향을 보이고 있으며, 파괴모드의 변화 양상 또한 동일하다. Hassan (1994)의 연구 결과에 따르면 동일한 개수의 볼트를 가지며 기하학적 추천 치수를 만족하는 가로로 배열된 볼트연결부와 세로로 배열된 볼트연결부의 강도는 거의 동일하다고 언급하고 있다. 이 연구의 결과는 Hassan의 연구결과와 일치하는 결론을 보이고 있다.

5. 결론

이 연구는 2개의 볼트를 이용한 PFRP 볼트연결부의 겹침이음에 대한 실험적 연구이다. 2개의 볼트를 가로와 세로로 배열한 2가지 볼트배치와 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e_1/d_b)를 변수로 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) PFRP 볼트연결부가 기하학적 추천값을 모두 만족하는 경우, 가로로 2개의 볼트를 배치한 경우와 세로로 2개의 볼트를 배치한 경우의 파괴지압응력은 거의 동일하였다. 이 결과는 Hassan(1994)이 수행하였던 연구결과와 일치한다.

(2) PFRP 볼트연결부의 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e_1/d_b)가 증가하면 볼트연결부의 파괴지압응력도 증가하였다. 그러나 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e_1/d_b)의 증가에 따른 파괴지압응력의 증가량은 점차 감소하였다.

(3) PFRP 볼트연결부의 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e_1/d_b)가 3인 경우에는 볼트연결부의 파괴모드가 일부 시편에서 지압파괴를 동반하지 않는 전단파괴가 발생되었으나, 4 이상에서는 지압파괴모드가 먼저 발생한 후 전단파괴가 발생하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 갑작스러운 파괴(No warning failure)를 방지하고 지압파괴를 유도하기 위해서는 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e_1/d_b)를 4 이상으로 해야한다는 것을 의미한다.

(4) 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e_1/d_b)에 대한 강재의 규정은 볼트호칭에 따라 최소 1.4~1.75 이상을 확보하도록 하고 있으며, 결론적으로 2 이하의

값을 가진다. 이에 비하여 PFRP에 대한 볼트직경에 대한 연단거리의 비(e_1/d_b)는 규정에 따라 2~4의 값 이상을 확보하도록 하고 있다. 이것은 강재에 비하여 전단에 취약한 PFRP 재료의 특성에 따른 것이라고 판단된다.

이 연구에서는 2개의 볼트만을 이용하여 실험을 수행하였으며, 3개 혹은 그 이상의 볼트가 배치되거나 배치의 형태가 달라지는 경우에 대해서는 실험을 수행하지 않았다. 따라서 이 연구의 결론은 실험에 사용된 PFRP 상용재료와 이러한 볼트배치 형태에 한정된 결론이다. 그러므로 향후 다양한 PFRP 시편과 다양한 볼트 배치 형태, 볼트 사이의 간격 등 다양한 기하학적 변수를 추가한 연구가 수행되어야 할 것이다.

Bolted Lap-Joint Connection in the Pultruded FRP Structural Members,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 1, pp. 37-43. (written in Korean)

- Lee, Y. G., Park, S. Y., Park, J. S., Nam, J. H., An, D. J., and Yoon, S. J. (2011), Structural Behavior of PFRP Connection with Single Bolt, *Proceedings of 18th International Conference on Composite Materials (ICCM18)*, August, Jeju, Korea.
- Lee, Y. G. (2013), Connection Behavior of Bolted Joints for the PFRP Structural Members, *Ph.D Thesis*, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea.

References

- ACMA (2010), *Pre-standard for Load and Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- Bank, L. C. (2006), *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*, Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Hassan, N. K. (1994), Multi-bolted Connections for Fiber Reinforced Plastics Structural Member, *Master Thesis*, Department of Structural Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt.
- Hollaway, L. C. (2010), “A Review of the Present and Future Utilisation of FRP Composites in the Civil Infrastructure with Reference to their Important In-service Properties,” *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2419-2445.
- Lee, Y. G. (2009), The Characteristics of Structural Behavior of Bolted Connection for the PFRP Structural Member, *Master Thesis*, Hongik University, Korea. (written in Korean)
- Lee, Y. G., Shin, K. Y., Joo, H. J., Nam, J. H., and Yoon, S. J. (2010-a), “Modified Design of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System,” *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 1, No. 4, pp. 18-27. (written in Korean)
- Lee, Y. G., Shin, K. Y., Joo, H. J., Nam, J. H., and Yoon, S. J. (2010-b), “Structural Behavior of