

보강판시스템에 적용되는 판형보강재의 국부좌굴거동

김경식^{1*}

¹청주대학교 토목공학과

Local Buckling Behaviors of Flat-Type Stiffeners in Stiffened Plate System

Kyung-Sik Kim^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Cheongju University

요 약 판형보강재의 강성 및 세장비의 영향이 보강판시스템의 면내압축강도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 탄성 및 비탄성 극한강도해석이 수행되었다. 탄성좌굴해석에서는 보강재의 국부좌굴현상이 고려될 수 없지만 보강재의 강성이 일정정도 확보되면 역대칭모드 좌굴현상이 발생되면서 보강판의 면내압축강도가 확보되는 것으로 파악되었다. 초기결함 및 잔류응력이 고려된 극한강도해석에서는 초기결함의 모드형상이 극한강도에 민감하게 영향을 미친다는 사실이 확인되었다. 도로교설계기준에서 제시하는 판형보강재의 세장비제한은 해석 결과와 비교하였을 때 보수적인 수치로 평가되었다.

Abstract Elastic and nonlinear ultimate strength analyses were conducted to examine the effects of the stiffness and slenderness of flat-type stiffeners on ultimate in-plane strengths of a stiffened plate system. Although it is not feasible to consider local buckling in the stiffeners in elastic analysis, it was confirmed that the in-plane strengths of the stiffened plate system can be achieved by antisymmetric buckling mode when a certain level of stiffness in the stiffeners is provided. Nonlinear ultimate strength analysis, in which initial imperfection and residual stress are incorporated, showed that the ultimate strengths are sensitively affected by the modeshapes for initial imperfections. The slenderness limit for flat-type stiffeners in KHBDC (Korean Highway Bridge Design Code) was evaluated as conservative compared to the analysis results.

Key Words : Flat-type stiffener, Stiffened plate, Buckling, Initial imperfection, Residual stress

1. 서론

면내력(in-plane force)에 저항하는 판에 힘을 받는 방향으로 보강재를 설치하면 그 압축강도를 월등히 향상시킬 수 있다. 이러한 보강판시스템(stiffened plate system)은 토목 및 해양 구조물 등에 광범위하게 적용되고 있으며 채택되는 형상에 따라 보강재는 판형(flat type), T형, U형 등으로 분류된다. 박스단면의 강거더교량의 경우 압축플랜지 및 웹에 적절히 보강재가 설치된다. 보강재로 보강된 보강판시스템의 면내 강도를 산정함에 있어 단면

2차모멘트로 대표되는 보강재의 강성은 보강되는 판의 두께, 폭, 형상비 등과 함께 가장 주요한 파라미터가 된다. 보강재 강성의 증가가 보강판시스템의 면내압축강도의 향상으로 향상 이어지는 것은 아니고 일정 이상 강성을 확보하면 보강재의 강성이 증가하더라도 전체 보강판시스템의 압축강도에는 더 이상 영향을 주지 않는다[1]. 탄성좌굴거동에 의한 판 자체의 거동은 기존 고전 판좌굴이론[2,3]으로 잘 정립되어 있으나 보강재 강성과의 상호작용이 고려된 보강판시스템의 극한거동 연구는 최근 비선형 유한요소해석기법의 발전과 더불어 활발히 진행 중

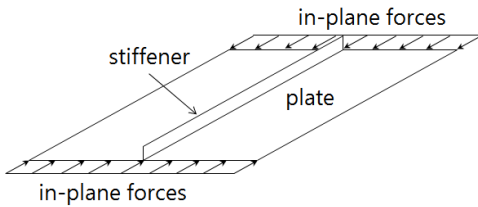
이 논문은 2012-2013학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

*Corresponding Author : Kyungsik Kim(Cheongju Univ.)

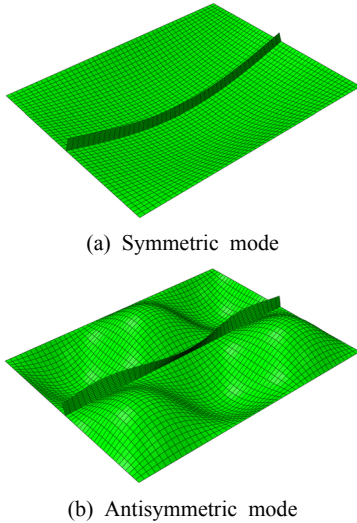
Tel: +82-43-229-8472 email: kkim@cju.ac.kr

Received October 30, 2013 Revised November 20, 2013 Accepted December 5, 2013

이다[4,5].



[Fig. 1] Stiffened plate system with flat-type stiffener



[Fig. 2] Buckling modes of stiffened plates

Fig. 1에는 판형 보강재(flat-type stiffener)로 보강된 보강판시스템을 보여주고 있는데 강성대비 상대적으로 자중감소효과 크고 시공성이 우수하여 장대 케이블리지 교량을 비롯한 중·장경간 강거더교량 등에서 많이 활용되고 있다. 면내력을 받는 보강판의 탄성좌굴모드(elastic buckling mode)는 보강재의 강성에 따라 Fig. 2에 보인 바와 같이 대칭모드(symmetric mode) 및 역대칭모드(antisymmetric mode)로 구분된다. 보강재 자체의 휨강성이 부족할 경우 보강재가 판과 함께 휘는 현상인 대칭모드를 보이게 되고, 보강재 휨강성이 일정이상 확보될 경우 Fig. 2(b)처럼 역대칭모드를 보이면서 보강판의 면내 압축강도는 효율적으로 향상된다. 보강재와 판이 만나서 이루는 접선이 탄성좌굴이 발생된 뒤에도 직선을 유지하는 역대칭모드 좌굴을 유도하기 위한 보강재의 최소강성은 T형 보강재에 대상으로 Yoo et al.[1]에 의해 제안되었다. 판형에 대해서는 Thang et al.[6]이 제안하였으나 보강재의 국부좌굴현상이 해석에 고려되지 않았다. 보강재

의 휨강성은 보강되는 판의 두께중심선을 기준으로 한 단면2차모멘트를 기준으로 하지만 판형 보강재의 경우 세장비가 커지면 보강재 자체의 국부좌굴여부가 추가로 검토되어야 한다.

본 연구에서는 보강되는 판과 보강재의 상호작용을 고려된 보강판시스템의 극한거동을 비선형/비탄성 유한요소해석기법을 활용하여 분석한다. 대상 강재로는 교량용으로 널리 채택되는 SM520을 기본으로 하고 보강재의 형상은 제작성과 경제성이 높은 판형(flat type)으로 한다. 전형적인 보강판시스템을 예제로 하여 극한 압축강도해석을 통해 효율적인 보강재의 강성을 검토하고 판형 보강재의 국부좌굴을 방지하기 위한 세장비 제한을 제시한다.

2. 보강재의 최소강성

도로교 설계기준 한계상태설계법[7]에 의하면 다중 또는 단일 강박스거더 단면에서 면내 압축력을 받는 압축 플랜지에 설치되는 종방향 보강재는 등간격으로 배치해야 함을 기본으로 하고, 그 돌출폭 h 는 다음을 만족하여야 한다고 규정하고 있다.

$$h = 0.48t_s \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (1)$$

여기서, t_s 는 보강재의 두께 (mm), E 와 F_y 는 MPa 단위를 가지는 탄성계수 및 항복응력을 각각 나타낸다. 또한 동 설계기준은 각 보강재의 최소 강성으로 단면2차모멘트가 다음을 만족하도록 규정하였다.

$$I \geq \psi w t^3 \quad (2)$$

여기서,

$$\psi = 0.125k^3 \quad (n=1인 경우)$$

$$= 0.07k^3n^4 \quad (n=2, 3, 4, 5인 경우)$$

n = 등간격 보강재의 수

w = 보강재 사이 폭과 판의 연단에서 가장 가까운 보강재까지의 거리 중 큰 값 (mm)

t = 보강되는 판 두께 (mm)

k = 좌굴계수

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[8]의 경우 식 (2)와 동일한 식을 제안하고 있으나 보강재의 개수

를 2개까지만 인정하여 ψ 의 값을 다음과 같이 규정하였다.

$$\psi = 0.125k^3 \quad (n=1 \text{인 경우}) \quad (3a)$$

$$= 1.120k^3 \quad (n=2 \text{인 경우}) \quad (3b)$$

식 (3a) 및 (3b)는 보강판 설계는 보강재의 개수를 줄이는 방향으로 반영되었음을 보여준다. 한 편, 보강재 수가 2개를 초과할 경우 AASHTO LRFD는 FHWA-TS-80-205[9]를 따를 것을 추천하고 있는데 동 기준에서는 보강재의 국부좌굴을 방지하기 위한 두 가지 제한을 두고 있다. 첫째로 작용 응력의 크기에 따른 유효 세장비계수(effective slenderness coefficient) C_s 를 다음과 같이 제한한다.

$$C_s \leq \frac{0.4}{\sqrt{F_y/E}} \quad (f_{\max} \geq 0.5F_y) \quad (4a)$$

$$C_s \leq \frac{0.65}{\sqrt{F_y/E}} \quad (f_{\max} < 0.5F_y) \quad (4b)$$

여기서 $f_{\max}$ 는 전단지연이 고려된 최대 계수압축응력을 나타내고 유효세장비계수는 판형 보강재의 경우 다음 식으로 정의된다.

$$C_s = \frac{h}{1.5t_s} + \frac{a}{t} \quad (5)$$

여기서 h , t_s , a 는 보강재의 높이, 두께, 간격을 각각 나타낸다. t 는 보강되는 판의 두께이다. FHWA-TS-80-205[9]의 두 번째 제한은 돌출요소에 대한 세장비 제한으로 다음과 같다.

$$\frac{h}{t_s} \leq \frac{0.48}{\sqrt{F_y/E}} \quad (6)$$

식 (6)의 규정은 본질적으로 식 (1)의 제한사항과 같다. Yoo et al.[1]은 Fig. 2(b)에 보인 역대칭 좌굴모드를 구현하기 위해서 보강재가 가져야 할 최소 강성으로 보강재 사이 패널 형상비(aspect ratio)가 고려된 다음 식을 제안하였다.

$$I_0 = 0.3\alpha^2 \sqrt{n} wt^3 \quad (7)$$

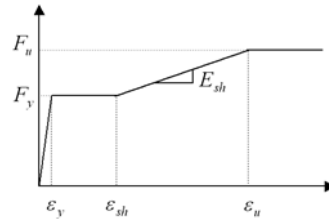
여기서 α 는 보강재 사이 패널의 형상비이다. 식 (4)는 T형 단면을 가지는 보강재를 대상으로 제안되었고, Thang et al.[8]은 판형(flat type) 보강재를 대상으로 보강재의 개수에 따라 다음 식을 제안하였다.

$$I_0 = (0.10\alpha^2 + 0.57\alpha) wt^3 \quad (n=1) \quad (8a)$$

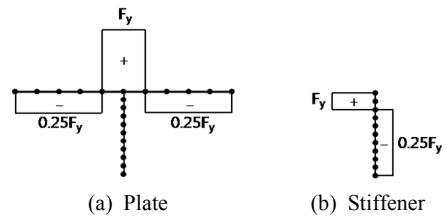
$$I_0 = \left(\frac{n+21}{60} \alpha^2 + 0.12\alpha \right) wt^3 \quad (n=2\sim5) \quad (8b)$$

[Table 1] Material properties

Steel ID	F_y (MPa)	F_u (MPa)	E (GPa)	ε_y	E_{sh} (GPa)	ε_{sh}
SM520	355	520	205	0.00173	3.6	0.02078



[Fig. 3] Multi-linear constitutive relationship

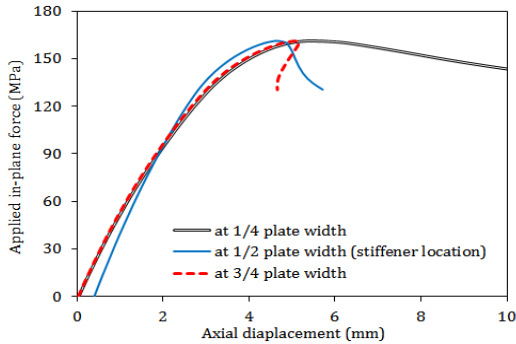


[Fig. 4] Residual stress distribution

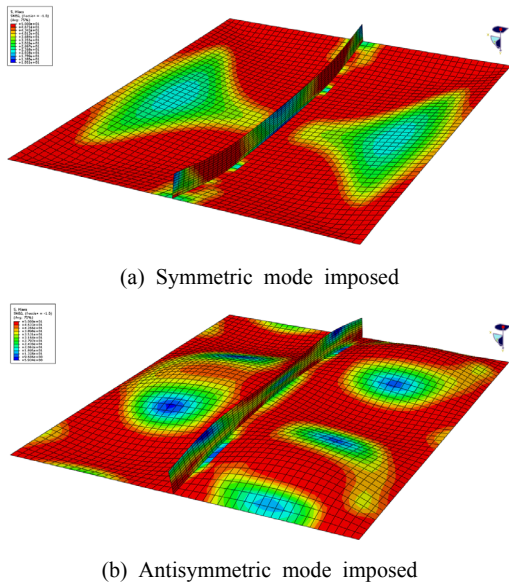
3. 보강판 극한거동 해석

보강재의 강성 및 강도가 보강판시스템의 극한압축강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS[10]를 이용하였다. 보강판의 구성요소는 다양하지만 본 연구에서는 보강판시스템의 압축강도에 미치는 보강재의 역할에 초점을 맞추어 보강재가 1개만 설치된 보강판을 분석대상으로 하였다. Fig. 1에 보인 바와 같이 해석예제는 길이 4,318 mm, 폭 1,778 mm, 두께 25.4 mm를 가지는 4변 단순지지된 판(simply supported plate)에 1개의 종방향 보강재가 설치된 보강판 시스템이다. 예제에 사용된 강종은 앞서 언급한 대로 강

교량에 적용성이 높았던 SM520으로 하였다. SM520 강재의 재료특성은 Fig. 3에 보인 바와 같이 다중선분(multi-linear) 응력-변형률 관계로 단순화하였으며 해당 값은 Table 1에 나타내었다.



[Fig. 5] In-plane force-displacement curve



[Fig. 6] Ultimate failure mode with von Mises stress distribution

비선형·비탄성 거동이 고려된 강판(steel plate)의 극한 강도해석에서 제작상의 초기결함과 용접·가스절단 등에 의한 잔류응력(residual stress)은 무시해서는 안 되는 주요인자로서 극한강도에 상당한 영향을 미친다[11]. 초기결합의 모드형상으로 탄성좌굴해석을 통해 얻어진 첫 번째 좌굴모드가 여러 해석적 연구에서 이용되어 왔다. 본 연구에서는 Fig. 2에 보인 대칭모드 및 역대칭모드, 두 가지를 기하학적 초기결합의 형상으로 각각 고려하여 극한 강도해석을 수행하였다. 그 크기는 보강재와 판의 연단사

이 거리 w 의 1/100을 취하였다. 또한 보강재와 판의 접합부에는 용접연결로 가정하여 잔류응력을 Fig. 4에 보인 패턴으로 해석 시 입력하였다. 이는 Fukumoto et al.[12]이 실험에 근거하여 제안하였는데 인장영역에는 그 크기가 항복응력에 도달하고 고려되는 단면 내에서 자체평형(self equilibrium)을 이루고 있음을 확인할 수 있다.

기하학적 초기결합과 잔류응력의 영향을 살펴보기 위해 보강재 두께 25.4 mm, 높이 241.3 mm를 가지는 모델에 대한 하중방향 힘-변위 곡선을 Fig. 5에 보였다. 탄성좌굴해석 첫째 모드인 역대칭모드가 초기결합형상으로 고려되었고, 기준위치로 면내하중이 재하되는 연단에서 보강재 설치지점 및 보강재와 판의 연단 사이 중간지점을 취하였다. 잔류응력의 영향으로 보강재 설치지점에서는 하중재하 전에 변위가 부분적으로 발생했음을 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

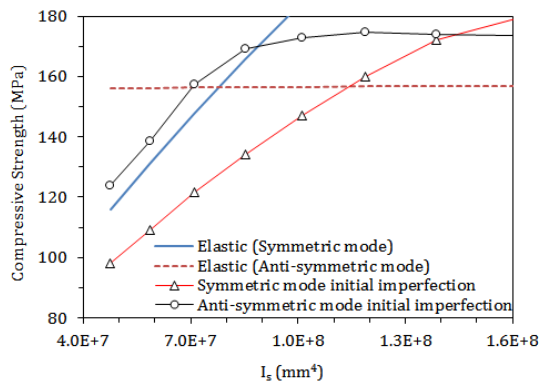
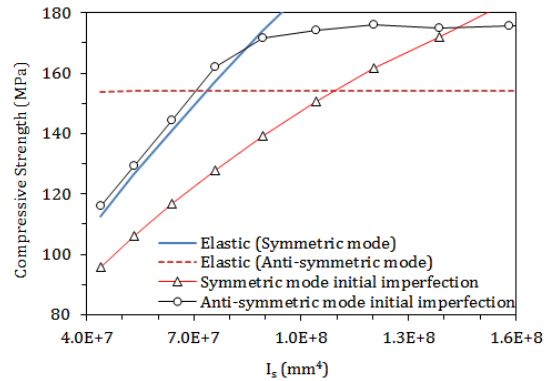
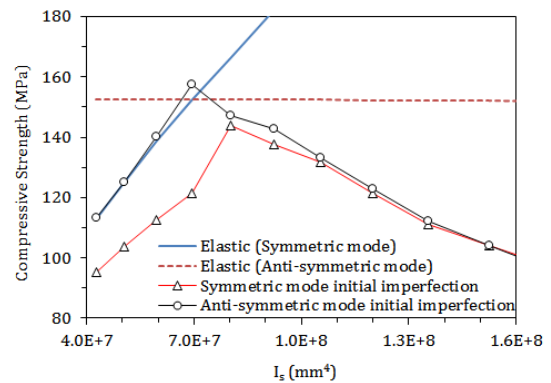
4. 보강재-판 상호작용

보강재와 보강되는 판의 극한강도 상호작용을 살펴보기 위해 보강재의 단면2차모멘트로 대표되는 강성과 폭·두께비로 대표되는 세장비를 변화시키면서 보강판시스템의 극한강도해석을 수행하였다. 보강되는 판의 치수는 앞서 기술한 바와 같고, 보강재의 두께는 보강되는 판두께 대비 1.0, 0.75, 0.5의 세 가지를 고려하였다. 판형보강재의 세장비는 7에서 28까지, 단면2차모멘트는 $4.26E+7 \sim 2.29E+8 \text{ mm}^4$ 사이 값을 고려하였다. 초기결합 모드형상으로는 대칭모드 및 역대칭모드를 각각 고려하여 동일 모델에 대해 두 번의 극한강도해석을 수행하였다. Fig. 6(a) 및 6(b)에는 대칭모드 및 역대칭모드를 초기결합으로 고려하였을 때 극한파괴상태의 예를 각각 보여준다. 파괴형상 뿐만 아니라 극한강도도 도입된 기하학적 초기결합 형상의 영향을 민감하게 받는 것으로 파악되었다. Fig. 7(a)~7(c)은 대칭모드 및 역대칭모드를 초기결합으로 각각 입력했을 때 보강재의 강성에 따른 보강판의 극한강도를 보여준다. 또한 동 그림에서는 탄성좌굴해석을 통해 얻어진 대칭모드 및 역대칭모드 강도도 함께 나타내었다. 탄성해석의 경우 역대칭모드 강도는 보강재 강성에 영향을 받지 않지만 대칭모드 강도는 보강재 강성이 커지면 증가하는 패턴을 보인다. 이 두 가지 강도 중에서 낮은 값이 그 보강판시스템의 지배 탄성좌굴강도(governing elastic buckling strength)가 된다. 보강재 강성이 낮은 경우 대칭모드 탄성좌굴강도가, 일정 이상의 강성이 확보되면 역대칭모드 탄성좌굴강도가 지배강도가 된다.

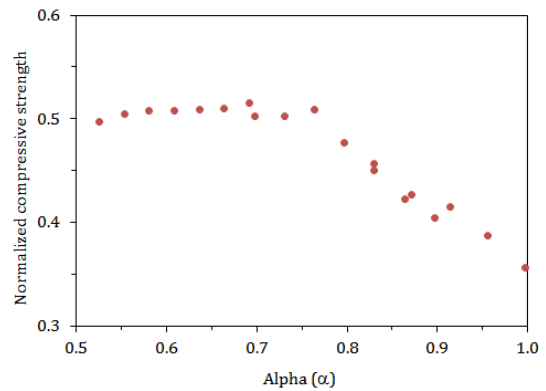
비선형비탄성이 고려된 극한강도해석에서는 대칭모드 초기결함을 입력하였을 경우 강도가 더 낮게 평가되었다. 이는 대칭모드 초기결함이 강도를 지배하게 된다는 것을 의미하지만 보강재 강성이 일정이상 확보되면 탄성좌굴 강도의 경우와 동일하게 역대칭모드 초기결함이 지배 극한강도(governing ultimate strength)가 된다. 이 때 보강재의 일정한 강성이란 탄성해석에서의 일정한 강성에 비해 상당히 큰 값을 Fig. 7(a) 및 7(b)에서 확인할 수 있다. 단면2차모멘트로 표현되는 강성이 확보되었다 하더라도 보강재 자체의 세장비가 크면 보강재에서 국부좌굴현상이 발생되어 보강판시스템의 강도를 제대로 구현할 수 없다. Fig. 7(c)는 보강재의 두께가 판두께의 1/2인 경우 강도곡선을 보여주는데 강성의 증가와 더불어 보강판 강도가 증가하다가 급격히 감소하는 구간을 확인할 수 있다. 이는 보강재의 세장비가 과다하게 커져 보강재 자체에서 국부좌굴이 발생하였기 때문이다. 앞서 각 설계기준에서 언급하였듯이 보강재의 제원이 제한되는 이유가 여기 있다. 식 (6)에 보인보강재의 제한사항과 비교하기 위하여 계수 α 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha = \frac{h}{t_s} \sqrt{F_y/E} \quad (9)$$

식 (9)에 정의된 α 값이 커지면 보강재의 국부좌굴 가능성은 그만큼 커진다고 볼 수 있다. 일정 이상의 강성을 가지는 보강재를 대상으로 α 값에 따른 보강판의 강도 변화를 Fig. 8에 보였다. α 값이 0.75 수준까지는 보강재의 국부좌굴은 발생되지 않는 것으로 판단될 수 있다. 도로 교설계기준[7] 및 FHWA-TS- 80-205[9]에서 제시한 0.48은 상당히 보수적인 값으로 평가된다.

(a) $t_s/t = 1.0$ (b) $t_s/t = 0.75$ (c) $t_s/t = 0.5$

[Fig. 7] Ultimate in-plane compressive strengths with different initial imperfection modes



[Fig. 8] Normalized strength vs. alpha value

5. 결론

면내력에 저항하는 판형보강재로 보강된 보강판시스템에 대한 극한강도해석을 수행하였다. 보강재의 강성 및

세장비의 영향이 보강판의 극한강도에 미치는 영향을 살펴 보았다. 탄성좌굴해석에서는 보강재의 국부좌굴현상이 고려될 수 없지만 보강재의 강성이 일정정도 확보되면 역대칭모드 좌굴이 발생되면서 보강판의 압축강도가 확보되는 것으로 파악되었다. 초기결함 및 잔류응력이 고려된 극한강도해석에서는 초기결함의 모드형상이 극한강도에 민감하게 영향을 미친다는 사실이 확인되었다. 도로교 설계기준에서 제시하는 판형보강재의 세장비제한은 해석결과와 비교하였을 때 50% 이상 여유도를 갖는 것으로 평가되었다. 향후 보강재의 개수에 따른 보강재의 강성 및 보강판의 강도산정에 대한 연구가 진행될 것으로 기대된다.

References

- [1] Yoo, C. H., Choi, B. H., and Ford E. M. "Stiffness requirements for longitudinally stiffened box-girder flanges," *Journal of Structural Engineering*, 127(6): 705-711, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:6\(705\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(705))
- [2] Bleich, F. Buckling strength of metal structures, McGraw-Hill Book Co., New York, NY. 1952.
- [3] Timoshenko, S. P. and Gere, J. N. Theory of elastic stability, McGraw-Hill Book Co., New York, NY. 1961.
- [4] Shin, D. K., Le, V. A. and Kim, K. "In-plane ultimate compressive strengths of HPS deck panel system stiffened with U-shaped ribs," *Thin-Walled Structures*, 63(2013): 70-81, 2013.
- [5] Kim, J. S., Lee, H. S. and Kim, K. "Ultimate strength evaluation for wide-type box girders in cable-supported bridges," *36th LABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) Symposium*, September 2013.
- [6] Thang, D. D., Koo, M. and Jeong Y. "Stiffness requirement for flat-bar longitudinal stiffener of box-girder compression flanges," *International Journal of Steel Structures*, 9(2009): 115-122, 2009.
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport. *Korea highway bridge design code*, 2012. (in Korean).
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials. *LRFD Bridge design specifications*, Washington, D. C. 2012.
- [9] Federal Highway Administration Officials of Research and Development. *Proposed design specifications for box girder bridges*, Report No. FHWA-TS-80-205,

Washington, D. C. 1980.

- [10] Abaqus Inc., *ABAQUS standard user's manual*. Version 6.8.-2, 2008.
- [11] Khedmati, M. R., Pedram, M. and Rigo, P. "The effects of geometrical imperfections on the ultimate strength of aluminium stiffened plates subjected to combined uniaxial compression and lateral pressure," *Ships and Offshore Structures*, 2012(8): 1-22, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17445302.2012.726761>
- [12] Fukumoto Y., Usami T. and Okamoto Y. "Ultimate compressive strength of stiffened plates," *Proceedings of specialty conference on Metal Bridge*, pp. 201-230, St. Louis, MO. 1974.

김 경 식(Kyung-Sik Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : Auburn University 토목공학과 (공학박사)
- 1992년 1월 ~ 1999년 8월 : 포항산업과학연구원 선임연구원
- 2005년 10월 ~ 2009년 8월 : GS건설 책임연구원
- 2009년 9월 ~ 현재 : 청주대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토목공학, 강구조공학, 강합성구조공학