

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 강도 예측에 대한 기초 연구

오영철* · 배동균** · 고재용**†

* 목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과, ** (주)한국종합설계 부설연구소

** 목포해양대학교 해양공과대학 조선해양공학과

Basic Research for Resistance Prediction of Aluminium Alloy Plate Girders Subjected to Patch Loading

Young-Cheol Oh* · Dong-Gyun Bae** · Jae-Yong Ko**†

* Dep. of Ocean System Engineering, Graduate School, MMU, Mokpo 530-729, Korea

** Annex Research Institute of Korea Consolidation Design Co., Ltd, Korea

** Dep. of Naval Architecture & Ocean Engineering, College of Marine Technology, MMU, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 본 연구에서는 실험 모형을 이용한 탄소성 대변형 시리즈 해석을 수행하여 플레이트 거더의 파손모드와 최종하중을 예측하였다. 수치해석 모형의 붕괴모드는 재하 시 플랜지에서 소성 힌지가 형성되었으며 실험모형의 붕괴모드와 일치하였다. 또한, 웹에서 항복선이 형성되어 크리플링 붕괴모드가 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며 각각의 실험모형과 수치모형 최종하중의 평균값 1.07, 표준편차 0.04, 변동계수 0.04로 선형성을 유지하였으며 전체 최종하중 결과도 대략 8% 오차를 나타내었다. 이는 수치모형 결과가 실험 및 적용 기준에 매우 만족하고 양호한 결과를 도출하였다고 생각한다. 따라서 알루미늄합금 플레이트 거더의 최종하중 예측 시 실험 및 적용 기준과 함께 병행하여 적용을 한다면 이에 대한 합리적 안전수준을 유지한다면 더 효율적이고 경제적 알루미늄 합금 플레이트 거더의 파손모드 및 최종하중에 대해 예측할 수 있을 거라고 생각한다.

핵심어 : 플레이트 거더, 패치 로딩, I형 용접 거더, 붕괴 거동, 최종하중

Abstract : In this paper, it performed to the elastic-plastic large deflection series analysis using the experimental model and predicted a failure mode and ultimate strength. The collapse mode of numerical analysis model is formed a plastic hinge on loaded flange and consistent with the collapse mode of experimental model. Also, The yield line is formed in the web could observed that have occurred the crippling collapse mode and the ultimate loads of the experimental model and numerical analysis model have maintained linearly Means 1.07, Standard deviation 0.04, Coefficient of variation(COV) 0.04 and the result of ultimate loads have appeared approximately 8% error rate. it was found that very satisfied to the experimental results and the applied rules. if it is considered to be maintain a reasonable safety level, it is possible to predict the failure modes of aluminium alloy plate girders and ultimate loads.

Key Words : Plate girder, Patch loading, I-type welded girder, Collapse behaviour, Ultimate load

* First Author : yochoh@mmu.ac.kr, 061-240-7476

† Corresponding Author : kojy@mmu.ac.kr, 061-240-7305

1. 서 론

플레이트 거더는 일반적으로 교량, 육상플랜트, 해양플랜트 등에서 주로 사용하고 있다. 최근, 해양관광 및 해양자원 개발 등으로 해상에 교량, 플랜트 등 같은 구조물 이용이 수년 동안 증가하고 있다. 이러한 구조물은 연강, 고장력강 등과 같은 강재를 사용하며 해양플랜트는 과거에는 목재(Timber), 강 등 다양한 재료를 이용했다. 육상구조물과 다르게 파랑하중을 비롯한 풍하중, 조류하중 등과 같은 다양한 외력을 수명주기 동안 지속해서 경험하게 되며 주변 환경 특성상 부·방식(腐防蝕)이 육상보다 심각하게 발생한다. 이는 각종 구조물에 심각한 손상을 입히게 된다. 최근, 해양환경을 고려하여 내식성과 구조 경량화 등을 증가시킨 알루미늄 합금을 주로 사용하고 고강도 대 중량비와 내구성 때문에 다양한 구조 공학 분야에서 사용하고 있다. 이러한 특성은 구조 편의성을 위한 낮은 유지보수와 긴 운용수명을 고려하여 경량 설계에 중요한 의미를 가지도록 하고 있다. 하지만 알루미늄 합금은 강(鋼)과 다르게 항복점이 명확하지 않으며 탄성한도를 초과하여 소성변형이 시작되는 초기 단계부터 큰 가공경화를 나타내는 특징을 가지고 있다. 또한, 용접 시 발생하는 열영향부(Heat Affected Zone)는 강재에 비해 넓으므로 열영향부가 최종하중에 미치는 영향이 크며 용입열(鎔入熱)은 알루미늄 합금 강도를 감소시키며 모재의 용입 부분의 전(全) 방향으로 확장된다. 헬리덱, 타워 갱웨이, 피팅 등과 같은 구조물은 판, 보, 거더 등으로 구성되어 있으며 이들은 국부 선 하중 혹은 패치 로딩이 빈번하게 발생한다. 패치로딩에 관한 연구는 지난 수십 년 동안 Roberts(1981), Lagerqvist(1994) 등에 의해 기초적인 이론이 정립되었으며 유럽코드(Europe code) 등에 반영되어 구조물 설계 시 이용하고 있다. Robert et al.(1998)는 알루미늄 합금 플레이트 거더에 대한 물리적 모형을 제안한 후 실험을 통해 재료특성에 따른 구조응답을 정식화하였다. Unosson(2003)은 스텐인리스강 플레이트 거더에 대한 실험과 수치해석을 수행하여 최종하중뿐만 아니라 구조응답에 대한 물리적 현상을 파악하였다. Gozzi(2007)는 현재까지 연구되어 왔던 결과를 종합하여 운항한계상태 기준을 기반으로 플레이트 거더의 기준을 재정립하였다. 본 연구에서는 Robert et al.(1998)가 도출한 실험 결과, 제안식, EN 1999-1-1(2007) 결과와 범용 유한요소 해석 코드인 ANSYS v14.5를 이용하여 탄소성 대변위 시리즈 해석으로 수행한 결과를 비교 검토하여 알루미늄 합금 플레이트 거더의 파손모드와 최종하중 특성을 예측하였다.

2. 유럽코드 설계기준

플레이트 거더의 굽힘, 패치 로딩 등에 관련 해석절차는 EN 1993-1-5(2005)와 EN 1999-1-1(2007)에서 규정하고 있는 기준을 종합하여 I형 완전 연성 단면을 고려하였다. 즉, 다시 말해 압축응력을 받는 국부 판 좌굴은 플레이트 거더의 정적 거동에 영향을 미치지 않는 것이다. 알루미늄 합금은 EN 1999-1-1(2007)에서 Ramberg-Osgood법을 대체 적용하여 변형률 경화 ϵ , 경화 지수 n 을 식(1)에서 나타내고 있다. 이러한 이유로 소성 굽힘 강도(Plastic bending resistance) $M_{c,Rd}$ 을 식(2)으로 산출한다. 여기서, W_{cl} 과 W_{pl} 은 탄성단면계수와 소성단면계수를 의미하며 α_{M1} 은 변형률 경화를 포함한 소성강도 산출 시 반영하는 보정계수이다. f_y 와 f_o 은 항복강도와 인장응력을 나타내며 γ_M 은 부분 안전계수이다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_{0.2}} \right)^n, \quad n = \frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{f_{0.2}}{f_{0.1}} \right)} \quad (1)$$

$$\text{Steel: } M_{c,Rd} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}, \quad \text{Aluminium: } M_{c,Rd} = \alpha_{M1} W_{cl} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

EN 1993-1-5(2005)과 EN 1999-1-1(2007)은 설계 강도(Design resistance of transverse forces) F_{Rd} 을 참조 패치 로딩에 대한 검토를 포함시킨 접근법은 강도함수 또는 감소계수(Reduction factor) χ_F 의미로써 부분적으로 감소시킨 소성 강도(Plastic resistance) F_y 을 기반으로 산출한다. 식(3.a)에서는 l_y 가 유효하중길이이며 이 길이는 물리 외곽 힌지 S_s 와 S_y 사이 거리로 나타낼 수 있으며 식(4)과 식(5)에서 사용한 기하 및 기계 물성치로 산출하며 l_y 는 횡 방향 보강재 a 사이의 거리를 초과할 수 없다. 세장변수(Slenderness) λ_F 는 식(6)과 식(7)에 의한 불안정성을 산출하며 식(8)로부터 구할 수 있다. 강도함수 χ_F 는 세장변수 λ_F 의 관계로 표현되며 식(9)로 나타낼 수 있다. 좌굴계수(Buckling factor) k_F 는 식(10)로 나타낼 수 있다. 여기서, γ_s 는 종 보강재 수를 의미하고 있다.

$$\text{Transverse load resistance: } F_{Rd,EC9} = \chi_F l_y \frac{f_{ow}}{\gamma_{M1}} \quad (3.a)$$

$$\text{Transverse load resistance: } F_{Rd,EC3} = \frac{\chi_F F_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.b)$$

Table 1. Geometrical proportion of 81 tests according to literature reviews

Author	Year	No. of tests	f_{yf}/f_{yw}	a/h_w	h_w/t_w	S_s/h_w	S_s/a
Skaloud and Novak	1975	5	0.84-1.14	1.0	400	0.1	0.1
Drdacky and Novotny	1977	8	0.92-1.07	1.0	74.81-168.07	0.1	0.1
Bergfelt	1979	5	0.90-1.11	1.0	193.23-400	0.05-0.1	0.05-0.1
Roberts	1981	26	0.98-1.59	0.8-2.4	81.96-505.05	0.06-0.2	0.08
Roberts and Markovic	1983	10	0.9-1.27	1.0	50.25-166.11	0.0-0.2	0.0-0.2
Roberts and Coric	1988	5	1.04-1.52	2.0	76.92-193.88	0.13	0.06
Lagerqvist	1994	9	1.01-1.1	3.6-4.4	50-115.8	0.09-0.34	0.02-0.08
Unosson	2003	5	0.95-1.16	3.7-4.42	45.55-106.92	0.09-0.33	0.02-0.08
Roberts and Shahabian	2001	5	0.75-1.39	1.0-2.0	146.34-281.25	0.05-0.1	0.05-0.08
Gozzi	2007	3	0.95	2.0	203.39	0.16-1.2	0.08-0.29
Granath	2000	146	0.76-1.5	1.0-13.8	40.59-400	0.0-0.4	0.0-0.2

Note: f_{yf} =Yield stress of flange, f_{yw} =Yield stress of web, a =Length of web, h_w =Height of web, t_w =Thickness of web, S_s = Loading length

$$\text{Effective loaded length: } l_y = S_s + 2 \cdot t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \leq a \quad (4)$$

$$\text{Dimensionless parameters: } m_1 = \frac{f_{of} \cdot b_f}{f_{ow} \cdot t_w}, m_2 = 0.02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 \quad (5)$$

if $\lambda_F \geq 0.5$ otherwise $m_2 = 0$

$$\text{Slenderness: } \lambda_F = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \quad (6)$$

$$\text{Plastic Resistance: } F_y = f_{yw} \cdot l_y \cdot t_w \quad (7)$$

$$\text{Critical load: } F_{cr} = 0.9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w} \quad (8)$$

$$\text{Reduction factor: } \chi_F = \frac{0.5}{\lambda_F} \leq 1.0 \quad (9)$$

$$\text{Buckling factor: } k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \quad (10)$$

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + \left(5.44 \cdot \frac{b_1}{a} - 0.21\right) \sqrt{\gamma_s}$$

3. 실험방법-문헌검토

플레이트 거더의 실험방법은 주로 Lagerqvist(1994)와 Roberts(1981)의 실험방법을 응용하여 사용하고 있다. 2,000년대에 수행한 실험방법은 Fig. 1과 Fig. 2에서 나타내고 있는 Gozzi(2007)와 Benjamin(2010), Chacón(2009)의 실험방법을 사용하고 있다. 상기 방법과 다른 점은 경계조건으로써 설명할 수 있다. Lagerqvist(1994)와 Roberts(1981)는 경계조건을 노

치(Notch)형태를 적용하여 단순지지 조건을 구현하여 실험을 수행하였으며 Gozzi(2007) 등 다른 연구자는 다음과 같은 방법을 적용하여 실험을 수행하는 경향을 나타내고 있다. 최근, 국내외에서 적용하고 있는 실험방법은 Fig. 1과 Fig. 2에서 나타난 것처럼 비슷한 방법으로 적용하고 있다.



Fig. 1. Test rig type: (a) Benjamin(2010), (b) Chacón(2009).

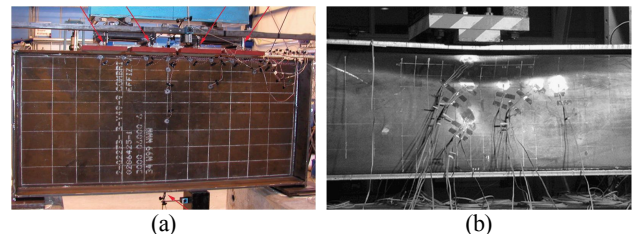


Fig. 2. LVDT and Strain gauge layout on one side of the web: (a) Gozzi(2007), (b) Chacón(2009).

이들 시험은 리그(Rig) 형태로 수행되며 제어기(Control unit)를 사용하여 1,000 kN 유압 작동기(Hydraulic actuator)를 작동시켜 하중을 재하(在荷) 하는 방법을 사용하고 있다. 하중 재하 시 최종하중에 도달할 때까지 일정한 수직 변위 속도로 적용하며 이후 속도를 증가시켜 구조 붕괴모드를 관찰한다. 시편 설치 시 경계조건은 강성 판에 단순지지 조건으

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 강도 예측에 대한 기초 연구

Table 2. Details of the aluminium alloy test girders and results

Girder	a [mm]	h_w [mm]	t_w [mm]	b_f [mm]	t_f [mm]	σ_{yw} [N/mm ²]	σ_{yf} [N/mm ²]	E [kN/mm ²]
AG1-P1	900	900	3.2	175	12.62	270	309	70
AG2-P1	900	900	3.2	175	15.6	270	309	70
AG3-P1	900	900	3.94	175	12.62	261	309	70
AG4-P1	900	900	3.94	175	15.6	261	309	70
AG5-P1	900	900	6.14	175	12.62	278	309	70
AG6-P1	900	900	6.14	175	15.6	278	309	70

Note: a =Length of web, h_w =Height of web, t_w =Thickness of web, b_f =Width of flange, t_f =Thickness of flange, σ_{yw} =Yield stress of web, σ_{yf} =Yield stress of flange, E =Young's modulus

로 적용하며 이것은 플레이트 거더의 양 끝에 첨부된 수직 보강재 혹은 강체를 수직 방향으로 높이 30mm를 하단 플랜지 아래 방향으로 확장시켜 강성 판에 구속하였다. 오른쪽 지지조건을 수평 방향이 제한되도록 지지조건을 구현시키기 위해 스테인리스강에 테플론(Teflon)을 코팅한 판을 설치하여 플레이트 거더에서 범선 하중 발생을 방지하도록 하였다. 시험 전 초기결함은 Fig. 2에서 나타난 것처럼 면의 초기결함을 웹에서 측정하도록 하였다. 웹의 면의 초기결함을 측정하기 위해 플랜지를 참조한 선형 변화 변위 추적기 (Linear Variable Displacement Transducer, LVDT)를 설치하여 웹의 수선 방향으로 측정하였다. 수직 경로에 따라 선형 변화 변위 추적기를 유도할 수 있는 강철봉(Steel bar)을 설치하고 정확한 측정지점을 나타내기 위해 웹에 격자를 나타내었다. 더욱이, 시험 동안 웹의 면의 초기결함은 임의의 하중구간에서 변형에 도달하였을 때 정지시켜 측정하였다. 웹의 좌굴 측정은 작용 하중 하단 중앙 수직선을 따라 측정하도록 하며 초기결함 측정에 사용하는 장비를 함께 사용한다. 모든 시편에서 먼저 발생하는 저항형태는 재하 패널에서 웹 폴딩(Web folding) 메커니즘을 관찰할 수 있으며 반원 형태의 항복선 뿐만 아니라 플랜지에서 호깅(Hogging)과 새깅(Sagging)변형을 관찰할 수 있다. 이를 관찰하기 위해 두 가지 형태의 스트레인 게이지를 사용하여 하중과 스트로크, 변형률, 변위를 컴퓨터에 기록하고 저장되도록 하였으며 수직 변위는 하중 판과 하단 플랜지 중앙 부분에서 측정하였다. 변형률은 시험 동안 단축 로제트 스트레인 게이지와 삼축 로제트 스트레인 게이지를 항복이 발생하는 웹의 중앙부분과 가장자리에 부착하여 변형률, 막 변형률(Membrane strain)을 측정하도록 하였다.

Table 1은 최근 연구결과를 저자별로 f_{yf}/f_{yw} , a/h_w , h_w/t_w , S_s/h_w , S_s/a 의 등비관계로 정리하였다. 문헌검토 결과와 Granath(2000)의 운항한계상태의 결과 및 수치해석 결과를 EN1993-1-5(2005)로 비교하여 최종하중과 세장변수($F_u/F_y - \lambda_F$) 상관관계로 나타내었다. Fig. 3의 (a)와 (b)에서 나타난

것처럼 최종하중은 EN1993-1-5(2005) 상(上)에 놓여있으며 이것은 구조적으로 안전하며 설계에 반영할 수가 있다고 생각한다. Fig. 3의 (b)에서 F_{FEM} 은 F_u 의 40%~80%의 값으로 분포하며 운항한계상태 결과로서 실험결과와 다르게 상대적으로 보수적인 강도 함수 분포를 나타내고 있다.

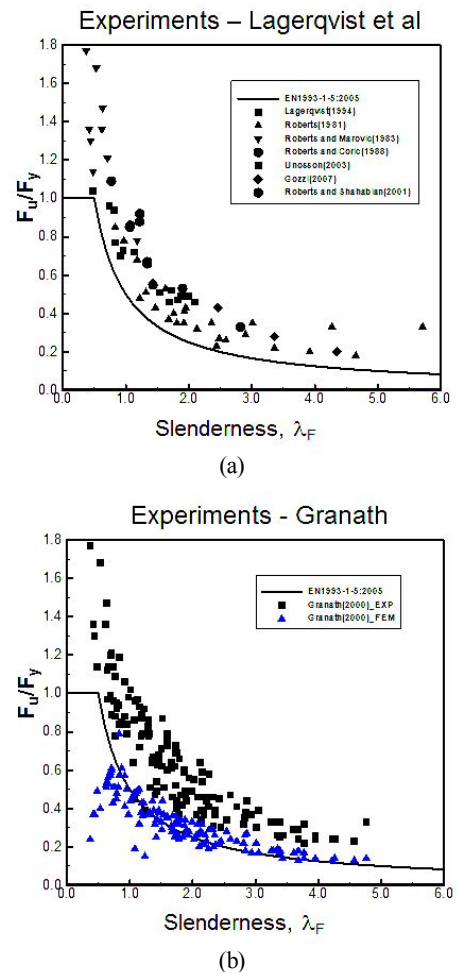


Fig. 3. The ultimate resistance-slenderness curve($F_u/F_y - \lambda_F$): (a) Literature review, (b) Granath(2000).

4. 수치해석 방법

박판 구조의 최종하중과 좌굴 후 거동은 최근 모든 산업분야에서 주요 관심을 가지는 물리 현상이다. 이는 하중 분담능력을 평가하는 기초로써 신뢰할 수 있는 하중-변위응답 예측법이다. 국부좌굴이 발생할 때 초기결함, 잔류응력 등은 제조 과정 시 발생하며 탄소성 대변위 해석 시 재료 비선형성으로 반영하여야 한다. 유한요소해석을 이용 시 구조의 최종하중 결정은 일반적으로 탄소성 대변형 시리즈 해석(Elastic-plastic large deflection analyses)을 수행하고 있으며 이러한 해석은 Crisfield(1973), Frieze et al.(1977) 등을 적용하였다.

플레이트 거더의 일반적인 하중은 굽힘 모멘트, 전단력, 패치 로딩 등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서 작용 하중은 수직으로 작용하는 국부 균일분포 하중 혹은 집중하중이며 이 하중을 패치 로딩이라 명명(命名)하고 있다. EN1999-1-1(2007)에서는 패치 로딩을 세 가지 형태로 분류하고 있다. 첫 번째는 플레이트 거더의 플랜지 상단 중앙에서 작용하는 수직 균일분포하중 혹은 집중하중이며 두 번째는 플랜지 상단 중앙에서 작용하는 수직 하중이다. 마지막으로 플랜지 상단 끝단에서 작용하는 하중으로 분류하고 있다. 본 연구에서는 기존 문헌에서 주로 수행하였고 플레이트 거더 구조에서 상시 발생하는 플랜지 상단의 국부 균일 분포하중을 적용하였다. 플레이트 거더의 평가방법은 이론방법과 실험방법으로 평가되며 이론방법에서 유한요소해석을 이용한 전산수치해석이 주로 활용되고 있다. 유한요소해석을 이용하면 비선형 변형, 특성 해석 등이 가능하므로 기존에 막대한 시험 비용과 설계비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 성능 향상에도 큰 이바지를 할 수 있다.

본 연구에서 탄소성 대변형 시리즈 해석(Elasto-plasticity large deflection series analysis)은 범용 유한요소 해석코드 ANSYS v14.5를 이용하여 기하 비선형과 재료 비선형 특성을 고려하였다. 비선형 해석기법은 NR법(Full Newton-Raphson method)와 호장증분법(Arc-length method)을 사용하였으며 호장증분법은 하중과 변위를 동시 제어하게 되며 하중-변위응답이 불안정점을 지날 때 접선강성행렬 값이 음(陰)인 경우 수치적으로 안정된 해를 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 분기점이 존재하지 않는 경우 가장 적합한 방법의 하나이다. 수렴기준은 수학적으로 식(11)과 같이 나타낼 수 있으며 반복구간에서 하중과 모멘트 오차의 SRSS(Square Root Sum of the Squares)가 작용하중의 SRSS의 0.01%가 되었을 때 수렴한 것으로 설정하였다. 해석 시 사용한 요소는 4절점 쉘 요소(4 node shell element)인 쉘 181(Shell 181)을 적용하였으며 이 요소는 절점마다 6자유도($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)를 가지고 있다(ANSYS Inc., 2000). 여기서, 잔차(Residual)의 L2(SRSS) norm은 $\| \{R\} \|_2 = \left(\sum R^2 \right)^{1/2}$ 이다.

Convergence criteria : $\| \{R\} \| < (\epsilon_R R_{ref})$ (11)

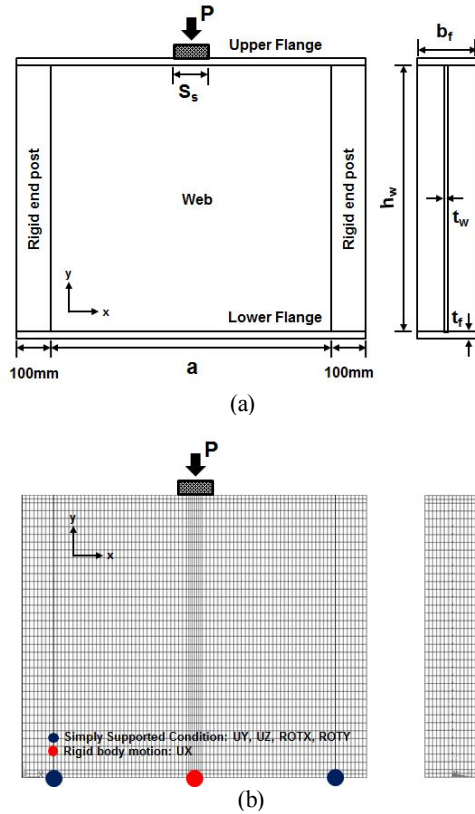


Fig. 4. Section and boundary condition of aluminium alloy plate girder: (a) Section, (b) Boundary condition.

알루미늄 합금 플레이트 거더의 모형은 Roberts et al.(1998)가 수행한 실험결과와 본 연구에서 수행한 탄소성 대변위 해석 결과를 비교 검토하였다. 수직 보강재는 플레이트 거더의 양단 가장자리에 위치시켰으며 경계조건은 수직 보강재의 하단에 있는 모든 절점을 x 방향 변위와 z 방향 회전만을 허용하였으며 하중길이 S_s 는 사각형 단면속성을 지닌 폭 $50\text{mm} \times b_f$ 단면으로 적용하였다. 플레이트 거더의 재료 물성치는 알루미늄 합금 AL6082를 적용하였으며 표준 인장시험을 통해 0.2% 오프셋 항복응력 σ_y 와 탄성계수 E 를 결정하였다. 열영향부(Heat Affected Zones)에서 재료 연화의 급랭도를 결정하기 위해 용접 십자 형태의 시편을 사용하여 웹의 0.2% 오프셋 정적 인 응력을 결정하여 모재의 약 50%를 적용하였다. 재료 경화거동은 탄소성 거동을 고려하도록 하였다. 또한, 초기결함은 탄성좌굴 1모드를 적용하여 초기결함 크기를 $h_w/200$ 으로 적용하였다. Table 3은 플레이트 거더의 제원 및 재료 물성치를 나타내며 Fig. 4는 플레이트 거더의 제원과 단면속성, 경계조건을 나타내고 있다.

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 강도 예측에 대한 기초 연구

요소분할(Mesh)은 해석결과에 많은 영향을 미치는 매개변수 하나이며 유한요소해석 시 반드시 수행하여 결과의 신뢰성을 확보하여야 한다. 요소분할을 넓고 조잡한 형태로 나누면 부정확한 결과를 도출되며 반대로 좁고 조밀한 형태로 생성하면 해석시간과 비용이 상대적으로 증가하므로 유한요소해석 시 적합한 요소분할 크기를 산정하여야 한다. 또한, 해석 결과에 영향을 미치는 주요 변수는 요소형태(Element type)선택에 대한 결정 문제를 내포하고 있다. 추가로 재료 특성에 대한 이해가 필요하며 탄소성 대변형 시리즈 해석 시에 적용한 알루미늄 합금에 대한 열영향부의 분할 크기에 따른 검토를 수행하였다.

Table 3은 요소형태를 4절점 쉘 요소(4-node shell element)를 사용하여 요소분할 크기별로 나누어 최종하중 결과로 나타내었으며 최종 요소분할 크기를 12.5×25로 선정하였다. 선정 이유는 Table 5에서 설명하고 있는 열방향의 열영향부의 영향을 반영하기 위해 상기 크기로 선정하였다.

Table 3. The ultimate resistance according to mesh size

Overall Mesh[B×H]	Ultimate Load[N]	Element Number[EA]
25×25	94,811	4,736
25×12.5	86,167	15,912
25×6.25	83,545	39,040
12.5×25	89,086	10,672
12.5×12.5	85,938	18,016
12.5×6.25	83,256	50,048
6.25×25	88,197	21,952
6.25×12.5	84,099	31,744
6.25×6.25	83,186	72,064

Table 4는 요소형태에 따른 최종하중 영향을 파악하기 위해 4절점 쉘 요소와 8절점 쉘 요소(8-node shell element)를 사용하여 비교 검토하였다. 요소형태에 따른 최종하중은 약 6.4kN정도 차이가 발생하였다. 따라서 8절점 쉘 요소를 선택하여 해석을 수행하여야 하지만 해석시간을 고려하여 4절점 쉘 요소를 선택하였다.

Table 4. The ultimate resistance according to element type

Element Type	Overall Mesh[B×H]	Ultimate Load[N]
Shell 181	12.5×25	89,086
Shell 281		82,579

Table 5는 열영향부의 열(Row) 방향으로 요소분할 크기를 2"로 나누어 최종하중에 대한 영향을 분석하였다. 또한, 최종 요소분할 크기를 12.5×25, 열영향부의 열 방향 요소분할 크기를 두 개로 결정하여 탄소성 대변형 시리즈 해석을 수행하였다. Fig. 5는 Table 5에서 나타내고 있는 열영향부의 요

소 분할 크기를 나타내고 있으며 EN 1999-1-1(2007)을 반영하여 웹과 플랜지 교차 부분, 수직 보강재와 웹 교차 부분의 열영향부를 모두 적용하여 요소를 나누었다.

Table 5. The ultimate load according to element rows in HAZ

Rows of Elements	Overall Mesh[B×H]	Ultimate Load[N]
2 ⁰	12.5×25	75,918
2 ¹		71,119
2 ²		65,589

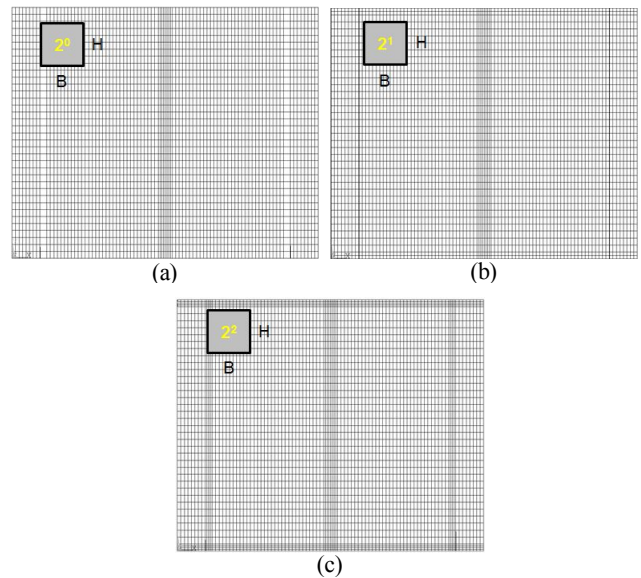


Fig. 5. Element Rows in the HAZ: (a) 2⁰, (b) 2¹, (c) 2².

5. 수치해석 결과 및 비교분석

일반적으로 플레이트 거더에 도입된 집중하중 혹은 패치로딩(Patch loading)은 강구조물에서 작용하는 하중이며 압연 강재 보(Rolled beam), 냉간압연 거더(Cold formed girder), 용접 거더(Welded girder) 등으로 구성된 구조물에서 발생한다. 현재까지 I형(型) 용접 거더를 고려한 탄소(Carbon), 탄소-망간(Carbon-Manganese) 혹은 조질형 강(Quenched and tempered steel) 등을 이용하여 중점적으로 연구를 진행하고 있다. 이 구조는 다양한 하중을 극복하도록 설계되어야 하며 특히, 플랜지에서 굽힘 응력을 일으킨 압축력 혹은 인장력을 극복하여야 하며 웹은 패치 로딩 때문에 발생한 전단하중 뿐만 아니라 국부 압축하중을 극복할 수 있도록 하여야 한다. 또한, 웹 높이가 높아지면 중량을 감소시키기 위해 두께를 얇게 하여야 하며 플랜지에서 압축력 및 인장력을 증가시켜 합리적인 중량, 비용, 강도 등을 절충하여야 한다. 집중하중을 받는 플레이트 거더의 파손모드는 플랜지에서 호깅(Hogging)과 새깅(Sagging)변형을

유발하는 운동학적 호환성에 의해 웹 폴딩(Web folding)이 발생한다. Lagerqvist(1994) 등은 최종하중 예측을 위한 탄성 임계하중식과 물리모형을 제안하여 플레이트 거더의 한계상태를 재계산하였다. 일반적으로 이런 모형은 우선하여 한계상태 해석이론에 기반을 두고 있으며 플랜지에서 발생하는 퍼텐셜 소성힌지(Potential plastic hinges)뿐만 아니라 웹패널에서 발생하는 퍼텐셜 항복 선(Potential yield lines)으로 정의한다. 최근, 패치 로딩 현상은 유사한 불안정성 문제로 EN 1993-1-5(2005) 및 EN 1991-1-1(2007)에서 소성 강도를 불안정성으로 계산하여 감소계수를 부분적으로 적용한 기계모형으로서 정의하고 있다. 연구 특수성의 정확도 예측은 종 방향 혹은 횡 방향으로 보강재를 추가한 플레이트 거더에 패치 로딩을 적용해 플레이트 거더의 파손모드를 관찰하는 실험방법 및 수치 데이터베이스를 구축하고 있다. 하지만 EN 1993-1-5(2005) 및 EN 1999-1-1(2007)을 적용한 임의의 설계 경우 상당히 과소평가된 결과를 도출하며 특히, 밀폐형 횡 방향 보강재를 지닌 플레이트 거더 경우에서 발생한다. 집중하중을 받았을 때 등비비례(Geometrical proportions, 等比例)로 나타내는 플레이트 거더는 거의 관심을 가지지 않으며 Granath(1997) 등은 횡 방향 보강재의 퍼텐셜 영향과 최종하중에 관한 플랜지 모멘트를 정확히 산출하였다. 본 연구에서 Robert et al.(1998)의 실험모형 결과와 탄소성 대변위 해석결과를 비교 검토하여 패치 로딩을 받는 AL6082 알루미늄 합금 플레이트 거더의 파손모드와 최종하중 영향을 다음과 같이 분석하였다.

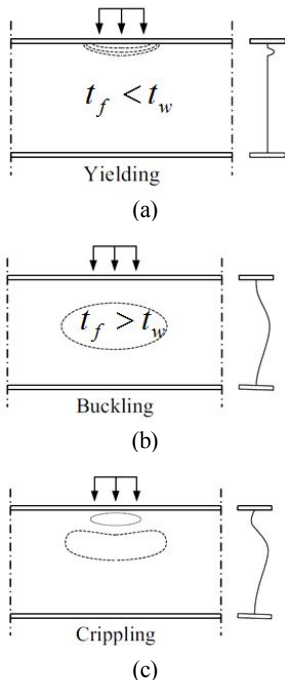


Fig. 6. Failure mode of a slender plate girder subjected to patch loading: (a) Yielding, (b) Buckling, (c) Crippling.

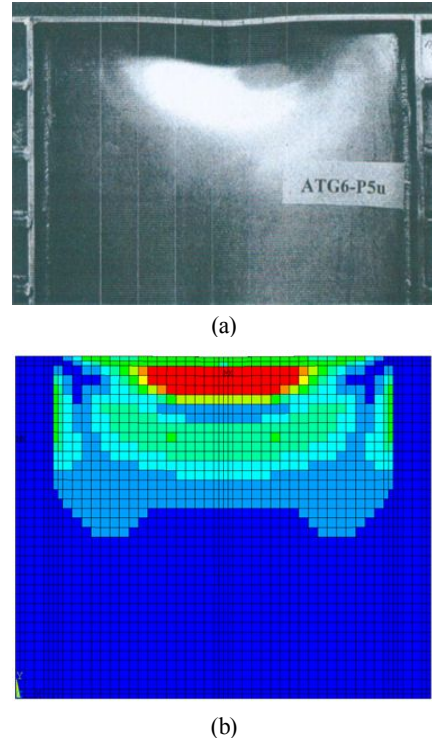


Fig. 7. Failure mode of a slender plate girder subjected to patch loading: (a) Robert et al.(1998), (b) Numerical analysis result.

패치 로딩을 받는 플레이트 거더의 관찰할 수 있는 파손모드 혹은 붕괴모드는 Fig. 6에서 나타내고 있으며 세 가지 붕괴모드로 설명할 수 있다. 웹에서 발생하는 (a) 항복(Yielding), (b) 좌굴(Buckling), (c) 크리플링(Crippling)이다. 크리플링과 좌굴 붕괴모드 사이에서 붕괴모드의 점진적 변화를 볼 수 있는 명확한 구분은 없지만 일반적으로 좌굴 붕괴모드가 먼저 발생하고 이후 최종하중 부근에서 크리플링 붕괴모드가 발생한다. Fig. 7은 Table 3에서 AG6-P1 모형의 붕괴모드를 나타내고 있다. (a)와 (b)의 붕괴모드를 살펴보면 크리플링과 좌굴 붕괴모드의 조합 붕괴모드로 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 Edlund(1988)의 실험에서 확인할 수 있듯이 세장 웹에서 크리플링과 좌굴 붕괴모드가 조합되어 발생하며 단면속성의 실제 파손모드이다. 즉, $t_f/t_w > 1$ 보다 더 크면 크리플링과 좌굴 붕괴모드를 의미하며 $t_f/t_w < 1$ 작으면 항복 붕괴모드가 발생하는 것을 의미한다.

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 강도 예측에 대한 기초 연구

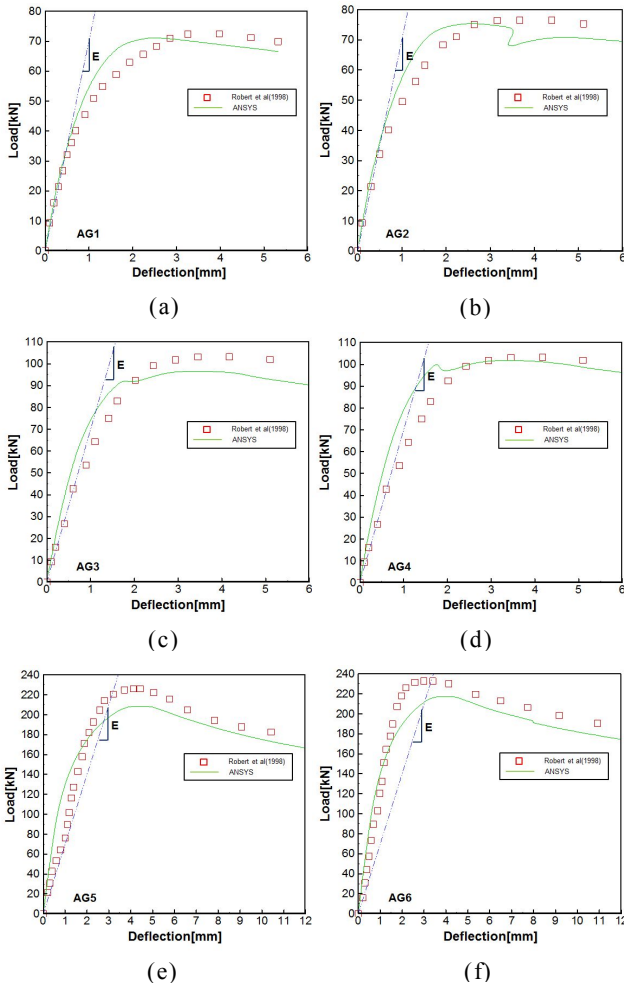


Fig. 8. Load-deflection relations for aluminium alloy test girders under patch loading: (a) AG1-P1, (b) AG2-P1, (c) AG3-P1, (d) AG4-P1, (e) AG5-P1, (f) AG6-P1.

실험방법과 수치해석 방법 결과를 비교하기 위해 재하 플랜지의 중앙 변위와 지지조건의 반력의 하중-변위 응답관계로 Fig. 8에 나타내었다. (a)-(f)에서 실험과 수치해석 방법 결과의 최종하중은 0.01-0.1% 오차율이 발생하였으며 붕괴 거동은 비슷한 형태로 발생하여 최종하중의 약 60~70%의 선형거동 이후 점차 비선형 거동을 나타내고 있다. 이것은 웹의 조합 붕괴모드인 크리플링과 좌굴 붕괴모드, 소성변형 때문에 발생하는 것으로 생각된다. 웹 두께와 플랜지 강도의 변화는 플레이트 거더의 붕괴에 커다란 영향을 미치고 있다는 것을 확인할 수 있다.

붕괴모드에 따라 플레이트 거더의 처짐 모드는 Fig. 9의 (a)와 같이 두 가지 처짐 모드로 구분할 수 있다. C-Shape는 앞에서 설명한 것처럼 $t_f/t_w < 1$ 일 때 주로 발생하는 처짐 모드이며 S-Shape는 $t_f/t_w > 1$ 일 때 발생하는 처짐 모드로 설명할 수 있다. (b)-(f)에서 관찰할 수 있듯이 패치 로딩을 받는 알루미늄

합금 플레이트 거더의 처짐 모드는 S-Shape로 나타나며 처짐 크기는 상대적으로 변화 폭이 작게 발생하고 있다.

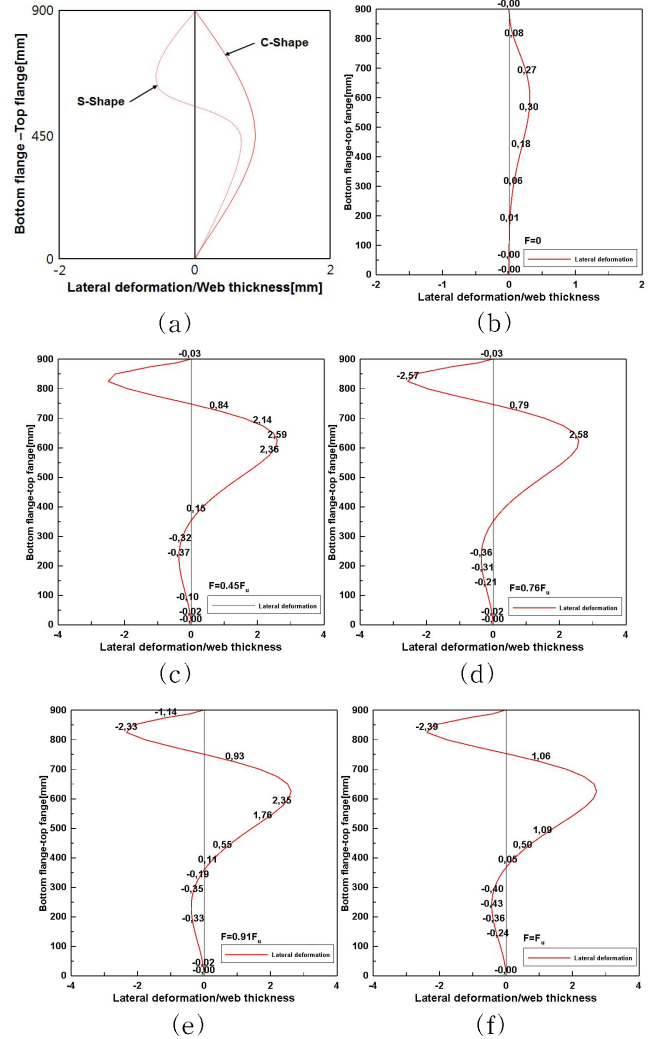


Fig. 9. Comparison of lateral deformations of web plate along the middle line of web according to numerical analysis: (a) typical deflection shape (b) Initial imperfection, (c) $F=0.45F_u$, (d) $F=0.76F_u$, (e) $F=0.91F_u$, (f) $F=F_u$.

그 이유는 알루미늄 합금의 재료 특성인 열영향부의 가공경화 때문에 붕괴모드가 초기에 플랜지와 웹의 교차 부분에서 좌굴 붕괴모드로 발생하며 점차 웹 중앙 부근에서 크리플링 붕괴모드가 발생하기 때문이다. 강 플레이트 거더 경우 앞서 설명한 것처럼 항복, 좌굴, 크리플링 붕괴모드로 나타나지만 알루미늄 합금 플레이트 거더는 재료 특성 때문에 좌굴과 크리플링 붕괴모드의 조합 붕괴모드로 나타난다. 이것은 열영향부뿐만 아니라 본 연구에서 반영하지 않은 잔류응력 등의 알루미늄 합금의 재료 특성 때문에 발생하는 것으로 생각한다. 구체적이고 정확

Table 6. Comparison of experimental and numerical and theoretical results

Girder	$P_{EXP}[kN]$	$P_{FEA}[kN]$	P_{EXP}/P_{FEA}	$P_{EXP}/P_{ubal}[Closed\ form]$	$P_{EXP}/P_{Rd}[EN\ 1999-1-1]$
AG1-P1	72	71.12	1.01	1.00	1.51
AG2-P1	76	75.41	1.01	1.00	1.53
AG3-P1	105	96.58	1.09	1.03	1.49
AG4-P1	113	101.85	1.11	1.05	1.55
AG5-P1	228	208.06	1.10	0.98	1.33
AG6-P1	234	217.26	1.08	0.96	1.33
Mean[AG1-AG6]			1.07	1.00	1.46
Standard deviation[AG1-AG6]			0.04	0.03	0.09
Coefficient of variation			0.04	0.03	0.06

한 결과를 도출하기 위해 앞으로 더 많은 연구 수행이 필요할 것으로 생각한다. 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종하중에 대한 이론 예측(P_{EXP}/P_{ubal})과 수치해석 예측(P_{EXP}/P_{FEA}), EN 1999-1-1(2007) 예측(P_{EXP}/P_{Rd})을 실험예측과 비교하여 Table 6에 나타내었다. 이론 예측과 실험예측, EN 1999-1-1(2007) 예측은 Robert et al.(1998)의 결과를 사용하였으며 수치해석 예측은 탄소성 대변형 시리즈 해석 결과와 비교 검토하였다. 이론 예측은 소성 파손 메커니즘을 기반으로 제안된 예측으로서 실험예측에 대해 매우 양호한 보정결과를 나타내고 있다. 또한, 수치해석 예측도 평균(Mean) 1.07, 표준편차(Standard deviation) 0.04, 보정 계수(Coefficient of variation, COV) 0.04 값을 가지며 양호한 보정결과 나타내고 있다. EN 1999-1-1(2007)예측은 실험결과에 대해 만족스러운 보정결과를 나타내고 있다.

6. 결론

패치 로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 대한 Robert et al.(1998)의 여섯 가지의 실험모형(AG1-P1~AG6-P2)을 이용하여 탄소성 대변형 시리즈 해석을 수행한 후 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 실험모형과 수치해석 모형의 붕괴모드는 재하 시 플랜지에서 소성 힌지가 형성되었으며 웹에서 항복선이 형성되어 크리플링 붕괴모드로 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.
- (2) 이론 예측, 수치해석 예측 등을 실험예측 결과와 비교하였을 때 이론 예측은 매우 양호하고 만족스러운 보정 결과로 도출하였으며 수치해석 예측도 양호한 결과를 나타내었다. 또한, EN 1999-1-1(2007)예측도 양호한 결과를 나타내었다.
- (3) 설계 시 패치 로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종하중은 이론 예측과 수치 해석 예측, EN

1999-1-1(2007) 예측을 사용하여 결정할 수 있으며 이는 상대적으로 강한 플랜지와 수직 보강재 간 거리가 짧은 플레이트 거더가 사용되었다. 이에 대한 합리적인 안전수준을 유지한다면 더 효율적이고 경제적 알루미늄 합금 플레이트 거더를 설계할 수 있을 것이다.

References

- [1] ANSYS Inc.(2000), ANSYS theory manual, Nonlinear buckling problem, Chapter 3, Part4, pp. 120-132.
- [2] Bergfelt, A.(1979), Patch loading on a slender web-Influence of horizontal and vertical web stiffeners on the Load Carrying Capacity, Chalmers University of Technology, pp. 1-149.
- [3] Benjamin, B.(2010), Stability of steel plates under combined loading, Inst. für. Konstruktion und Entwurf, Doctoral thesis, pp. 1-226.
- [4] Chacón, R.(2009), Resistance of transversally stiffened hybrid steel plate girders to concentrated loads, Universitat Politècnica de Catalunya. Department d'Enginyeria de la Construcció, Doctoral thesis, pp. 1-207.
- [5] Crisfield, M. A.(1973), Large-deflection elasto-plastic buckling analysis of plates using finite elements, Crowthorne, Berkshire, Bridges Design Division, Structures Dept, Transport and Road Research Laboratory, Report LR 593, pp. 27-45.
- [6] Drdacky, M. and R. Novotny(1977), Partial edge load carrying capacity tests on thick plate girder webs, Acta Technica CSAV, 5, pp. 614-620.
- [7] Edlund, B.(1988), Buckling and failure modes in slender plate girders under patch loading, Der Meallbau im Konstruktiven-Ingenieurbau, Karlsruhe, Germany, pp. 461-469.
- [8] EN 1993-1-5(2005), Eurocode 3-Design of steel structures-Part 1-5: Plated structural elements, Final Draft, CEN, Brussels,

2005.

- [9] EN 1999-1-1(2007), Eurocode 9-Design of aluminium structures-Part 1-1: General structural rules, CEN, Brussels, 2007.
- [10] Frieze, P. A., P. J. Dowling and R. E. Hobbs(1977), Ultimate load behaviour of plates in compression, Steel Plated Structures, Crosby Lockwood Staples, pp. 24-50.
- [11] Granath, P.(1997), Behaviour of slender plate girders subjected to patch loading, Journal of Constructional Steel Research 42, pp. 1-19.
- [12] Granath, P.(2000), Serviceability limit state of I-shaped steel girders subjected to patch loading, Journal of Constructional Steel Research 54, pp. 387-408.
- [13] Gozzi, J.(2007), Patch loading resistance of plated girders-Ultimate and serviceability limit state, Lulea University of Technology, Doctoral thesis, pp. 1-176.
- [14] Lagerqvist, O.(1994), Patch loading-Resistance of steel girders subjected to concentrated forces, Lulea University of Technology, Doctoral thesis, pp. 1-282.
- [15] Roberts, T. M.(1981), Slender plate girders subjected to edge loading, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 71, pp. 805-819.
- [16] Roberts, T. M. and N. Markovic(1983), Stocky plate girders subjected to edge loading, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 75, pp. 539-550.
- [17] Roberts, T. M. and B. Coric(1988), Collapse of plate girders subjected to patch loading, Miscellany Dedicated to the 65th Birthday of Academician Professor Dr. Nicola Hajdin, Naerlovic-Veljkovic N ed., University of Bergrade, Belgrade, pp. 203-209.
- [18] Roberts, T. M., A. W. Davies, A. C. Newmark and A. S. Bhogal(1998), Strength of aluminium alloy plate girders subjected to patch loading, Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs 128, pp. 376-384.
- [19] Roberts, T. M. and F. Shahabian(2001), Ultimate resistance of slender web panels to combined bending shear and patch loading, Journal of Constructional Steel Research 57, pp. 779-790.
- [20] Skaloud, M. and P. Novak(1975), Post-buckled behaviour of webs under partial edge loading, Acad. Sci. Rep. 85(3). Prague.
- [21] Unosson, E.(2003), Patch loading of stainless steel girders-Experimental and finite element analyses, Lulea University of Technology, Licentiate thesis.

원고접수일 : 2013년 12월 09일

원고수정일 : 2014년 02월 10일 (1차)

2014년 03월 07일 (2차)

게재확정일 : 2014년 04월 25일