

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종강도 예측식 추정

오영철*† · 서광철** · 고재용**

*, ** 목포해양대학교 해양공과대학 조선해양공학과

Ultimate Strength Prediction Formula Estimation of Aluminium Alloy Plate Girders Subjected to Patch Loading

Young-Cheol Oh*† · Kwang-Cheol Seo** · Jae-Yong Ko**

*, ** Dep. of Naval Architecture & Ocean Engineering, College of Marine Technology, MMU, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 본 논문에서는 교량, 선박 등에 사용하고 해양환경을 고려한 알루미늄 합금(A6082-T6) 플레이트 거더의 물리적 관계를 살펴보고자 한다. 플레이트 거더는 제품수명주기에 이동하중, 적재하중 등 같은 패치로딩을 경험하게 된다. 이 하중을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종강도에 대해 다수 수치모형을 적용하여 탄소성 대변형 시리즈 해석을 수행하고 회귀분석을 통해 예측식을 제안하였다. 예측식은 최종강도와 세장변수의 상관관계로 나타냈으며 세장변수가 낮을 경우(0-2.3) 약 9% 정도 오차가 발생하며 높을 경우(2.3-4.0) 약 1-2% 정도 오차가 발생하였다. 따라서 제안 예측식 적정성은 합리적으로 평가할 수 있는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 플레이트 거더, 탄소성 대변형 해석, 회귀분석, 예측식, 최종강도

Abstract : In this paper, Used on the bridge and ship, investigate the physical relationship of aluminium plate girders(A6082-T6) considering the marine environment. Plate girder will experience the patch loading such as moving load, surcharge in the product life cycle. The ultimate strength of aluminum plate girders subjected to these loads applied multiple numerical model and performed the elasto-plastic large deflection series analysis and was proposed the predicted formula for regression analysis. The predicted formula was shown by the relationship of ultimate strength and slenderness. If the slenderness is low(0-2.3), it causes a 9% error, and If the slenderness is higher(2.3-4.0), it causes a 1-2% error. Therefore, the propriety of proposed prediction formular was found to be assess rationally.

Key Words : Plate girder, Elasto-Plastic Large Analysis, Regression Analysis, Prediction Formula, Ultimate Strength

1. 서 론

플레이트 거더는 교량, 선박, 항공기 등 다양한 구조물에 폭넓게 적용되고 있으며 트러스(Truss) 구조에 비해 간결한 구조이다. 주로 장(長) 스패에 이용하며 세장한 판 요소로 이루어진 굽힘재이며 굽힘에 저항하는 플랜지와 전단에 저항하는 웹으로 구성되어 있다. 전단에 저항하는 웹은 경제적인 측면뿐만 아니라 전단이 굽힘에 비해 작기 때문에 얇게 제작한다. 전술한 바와 같이 플레이트 거더에서 웹은 박판으로 구성시키며 상대적으로 낮은 하중에 의해 쉽게 좌굴되므로 효율적이고 경제적 설계를 제공하기 위해 좌굴 후 강

도를 반드시 검토하여야 한다. 플레이트 거더는 열간 압연 강뿐만 아니라 알루미늄 합금을 이용하고 있다. 알루미늄 합금은 비중이 강재보다 훨씬 가벼워 중량절감을 하는데 많은 도움을 주며 특히 부·방식에 강하기 때문에 구조 유지하는데 비용을 절감하여 매우 유용하게 이용할 수 있다. 특히, 고강도/중량비와 내구성 때문에 모든 산업분야에서 적용하고 있다. 플레이트 거더의 최종강도에 대한 대규모 실험적 연구와 이론적 연구는 강제 위주로 연구되어 왔으며 알루미늄 합금에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서 패치로딩을 받는 A6082-T6 합금 플레이트 거더의 붕괴모드와 최종강도 예측식을 추정하여 알루미늄 합금 플레이트 거더의 초기 구조설계 시 응용하고자 한다.

† Corresponding Author : yochoh@gmail.com, 061-240-7476

2. 선행연구 및 동향

알루미늄 합금은 고강도/중량비와 내구성 때문에 토목, 조선해양, 항공 등 같은 다양한 구조공학분야에서 사용하고 있다. 하지만 용접열에 의해 플레이트 거더의 강도가 상당히 감소하므로 설계 시 강도감소계수를 포함시킬 필요가 있으며 최근까지 연구가 진행되고 있다.

Evans and Hamoodi(1987)은 알루미늄 합금 플레이트 거더의 붕괴거동을 연구하기 위해 22개 실험모형을 가지고 시험을 수행하였으며 이는 종방향 웹 보강재를 가진 플레이트 거더에 전단하중과 굽힘하중을 받는다고 가정하였으며 강과 같은 붕괴거동과 유사하였으며 웹은 열영향부에서 먼저 파손되었다. 특히, 전단하중 작용 시 장력장(Tension-field) 이론을 알루미늄 합금 플레이트 거더에 적용하면 과대평가할 수도 있다. 따라서 알루미늄 합금 플레이트 거더에 적용하기 위해 수정이 필요하다는 결론을 도출하였다

Robert et al.(1998)는 패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종강도에 대해 BS 8118와 EN 1999-1-1 설계코드에 부합하는 이론적 예측을 제안하고 실험결과와 비교하여 상당히 일치하는 보정결과를 나타내었다.

Amadahl et al.(2001)는 전단하중 또는 패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 붕괴거동에 중점을 두고 있으며 교량, 선박, 항공기 등 다수 구조물에 적용하였다. 알루미늄 합금은 열에 취약하기 때문에 급격한 강도감소를 경험할 수 있으며 정확한 강도평가를 위해 화재 시 안전성을 보장하기 위하여 시험을 상온과 고온에서 수행하고 비선형 유한요소 예측과 EN 1999-1-1 설계코드를 비교하였다.

Balaz and Kolekova(2014)는 패치로딩을 받는 플레이트 거더의 임계 탄성 좌굴하중을 산출하였으며 하중은 플랜지를 통해 적용하였다. 전단하중은 반력으로 발생하며 다른 저자에 의해 얻은 좌굴계수와 비교하고 전산프로그램 PLII을 이용하여 플레이트 거더의 좌굴계수를 확인하였다. 주변 지지조건은 단순지지조건으로 적용하고 중횡비 1-40, 하중폭 비 0.2-1.0으로 적용하였다. 수직보강재 유무와 플랜지 회전강성을 반영하였다.

Oh et al.(2014)는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종하중을 예측하기 위해 실험과 EN 1999-1-1:2007 설계코드의 결과를 탄소성 대변형 시리즈 해석결과와 비교하여 양호한 결과를 도출하였다.

3. EN 1999-1-1:2007 설계코드

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 강도는 EN 1999-1-1:2007 설계코드 등으로 적용할 수 있다. 설계강도

F_R 은 강도함수 또는 감소계수(Reduction factor) χ_F 의미로써 소성 강도(Plastic resistance) F_y 을 기반으로 식(1)과 같이 산출할 수 있다. 강도함수 χ_F 는 세장변수 λ_F 의 관계로 표현되며 식(2)로 나타낼 수 있다. 세장변수(Slenderness) λ_F 는 식(3)으로 나타낼 수 있으며 임계하중(Critical load) F_{cr} 은 식(5)로 나타내며 좌굴계수(Buckling factor) k_F 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 식(6)은 l_y 가 유효 하중길이이며 이 길이는 물리 외곽 힌지 $S_s + S_y$ 사이 거리로 나타낼 수 있으며 식(7)에 의해 무차원 매개변수를 구할 수 있다. l_y 는 횡 방향 보강재 a 사이의 거리를 초과할 수 없다(Oh et al., 2014).

$$\text{Transverse load resistance: } F_R = \chi_F F_y \quad (1)$$

$$\text{Reduction factor : } \chi(\lambda_F) = \frac{0.5}{\lambda_F} < 1.0 \quad (2)$$

$$\text{Slenderness: } \lambda_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{ow}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \quad (3)$$

$$\text{Buckling factor: } k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \quad (4)$$

$$\text{Critical load: } F_{cr} = k_F \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t_w^3}{h_w} = 0.9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (5)$$

$$\text{Plastic resistance: } F_y = l_y t_w f_{yw} \quad (6)$$

$$\text{Effective loaded length: } l_y = s_s + 2t_f \sqrt{m_1 + m_2} \leq a \quad (7)$$

$$\text{Dimensionless parameters: } m_1 = \frac{f_{of} b_f}{f_{ow} t_w} \quad (8)$$

$$m_2 = 0.02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \text{ if } \lambda_F > 0.5 \text{ otherwise } m_2 = 0$$

4. 플레이트 거더의 해석모형과 방법

수치모형의 데이터베이스는 웹 속성(t_w, h_w, f_{yw}), 플랜지 속성(b_f, t_f, f_{yf}), 하중길이 비(s_s/a) 등으로 구성시켜 네 그룹(Group)으로 구분하였다. 웹높이(h_w)을 기준으로 하여 그룹 내 세 가지 길이(a)의 변화에 따른 플레이트 거더의 최종강도를 구하였다. 하중크기가 결정되는 하중-길이 비(s_s/a)는 두 가지 형태로 적용하였으며 이 하중-길이 비는 Zetlin(1955) 등 연구자에 의해 주로 적용했던 하중-길이 비로 적용하였다. A6082-T6 합금 플레이트 거더의 항복응력은

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종강도 예측식 추정

Table 1에서 나타내고 있으며 탄성계수 E 는 70GPa , 포와송비 ν 는 0.33 을 적용하였다. 여기서, σ_y 는 항복응력(Yield stress), σ_t 는 인장강도(Tensile strength), n 은 가공경화지수(Work hardening rate)를 의미한다.

Table 1. A6082-T6 alloys properties according to the thickness

Base material						HAZ		
$(t \leq 5)$			$(5 < t \leq 25)$					
σ_y	σ_t	n	σ_y	σ_t	n	σ_y	σ_t	n
251	285	34.49	262	310	26.05	123	185	11.62

플랜지 단면속성은 Table 2로 정리 요약하여 나타내었다. 여기서, f_{yw} 는 웹의 항복응력(Yield stress of web), f_{yf} 는 플랜지의 항복응력(Yield stress of flange), h_w 는 웹높이(Height of web), a 는 플레이트 거더의 길이(Length), t_w 는 웹두께(Thickness of web), s_s/a 는 하중-길이비(Force-length ratio), t_f 는 플랜지의 두께(Thickness of flange), b_f 는 플랜지의 폭(Breadth of flange)을 의미한다.

Table 2. A6082-T6 alloys plate girder properties of the numerical simulations

Properties	Group I	Group II	Group III	Group IV
f_{yw} [MPa]	251	251	262	262
f_{yf} [MPa]	262	262	262	262
h_w [mm]	500	750	1,000	1,250
a [mm]	500	750	1,000	1,250
	1,000	1,500	2,000	2,500
	1,500	2,250	3,000	3,750
t_w [mm]	4	6	8	10
s_s/a	0.25, 0.5	0.25, 0.5	0.25, 0.5	0.25, 0.5
t_f [mm]	12	12	15	15
b_f [mm]	100	125	150	175
Joining location	2(edge, mid)	2(edge, mid)	2(edge, mid)	2(edge, mid)
Girders per group	12	12	12	12
Total number of numerical simulations	48			

Table 3에서 나타낸 것처럼 플레이트 거더의 웹높이(h_w)에 따른 종횡비(a/h_w) 1-3과 하중-폭 비(s_s/h_w) 0.25-1.5, 세장비(h_w/t_w) 125로 적용하여 매개변수별 수치해석을 수행하였다. 여기서, a/h_w 는 플레이트 거더의 종횡비(Aspect ratio), h_w/t_w 는 웹의 세장비(Slenderness ratio), s_s/h_w 는 웹높이에 따른 하중비를 의미한다.

Table 3. A6082-T6 alloys plate girder proportions of the numerical simulations

Properties	Group I	Group II	Group III	Group IV
h_w [mm]	500	750	1,000	1,250
a/h_w	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	3	3	3
h_w/t_w	125	125	125	125
s_s/h_w	0.25	0.25	0.25	0.25
	0.5	0.5	0.5	0.5
	0.75	0.75	0.75	0.75
	1	1	1	1
	1.5	1.5	1.5	1.5

알루미늄 합금 플레이트 거더에 대한 문헌 검토를 통해 실험방법을 고찰하고 탄소성 대변형 시리즈 해석을 통한 물리적 관계를 확인하고 합리적인 A6082-T6 합금 플레이트 거더의 최종강도 예측식을 추정하였다.

탄소성 대변형 시리즈 해석은 내연적 솔버(implicit solver) ANSYS v15.0을 활용하여 해석을 수행하였다. 수치모형의 민감도해석(Sensitivity analysis)은 Oh et al.(2014)의 결과를 참고하여 $12.5\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ 크기로 선정하였다. 요소종류는 웹과 플랜지는 Reissner-Mindlin 판이론에 기반을 둔 판요소 Shell181(4 node Shell181)을 사용하였다. Shell181은 6개의 자유도를 갖고 있으며 대변형, 소성, 초탄성 등을 지원하며 박판구조를 잘 설명할 수 있는 요소이다. 수직보강재는 강체요소 MPC184 요소를 사용하였다. 해석기법은 하중과 변위 응답경로를 추적할 수 있는 호장증분법(Arc length method or risk's method)을 이용하여 좌굴 후 거동을 추적하였으며 1차 고유치 좌굴 모드를 적용하였다. 초기처짐 크기는 EN 1999-1-1:2007 설계코드에 명시하고 있는 $\frac{h_w}{200}$ 로 적용하였다.

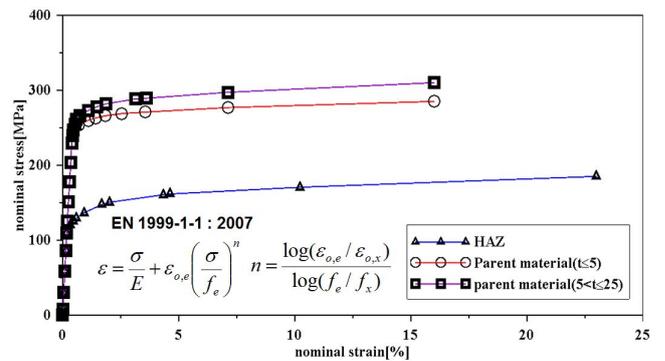


Fig. 1. A6082-T6 alloys stress-strain constitutive relationship.

A6082-T6 합금의 재료물성치는 Fig. 1에 나타낸 것처럼 Ramberg-Osgood 법에 의한 응력과 변형률 상관관계로 나타내었다.

$$\sigma_{vm} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

재료거동은 다중선형(Multi-linear) 특성을 가진 등방경화거동(Isotropic hardening behaviour)을 적용하고 항복평가기준은 식(9)와 같은 본 미세스(von-Mises) 항복기준으로 적용하였다.

Fig. 2에서 (a)는 플레이트 거더의 기하요소모델(Primitive model)이며 (b)는 유한요소모델(Finite element model)로 나타내었다. 주변 지지 조건은 (c)에 나타낸 것처럼 수직보강재와 하단 플랜지 교차지점의 절점을 x 축 변위와 z 축 회전을 허용하였다($u_y = u_z = \text{rot}_x = \text{rot}_y = 0$). 강체운동(Rigid body motion)을 방지하기 위해 하단 플랜지 중앙에 y 축과 z 축 변위를 허용하고 있다($u_x = 0$). 하중 P 는 최종한계상태를 예측하기 위해 최종강도에 도달할 수 있는 하중으로 적용하였다.

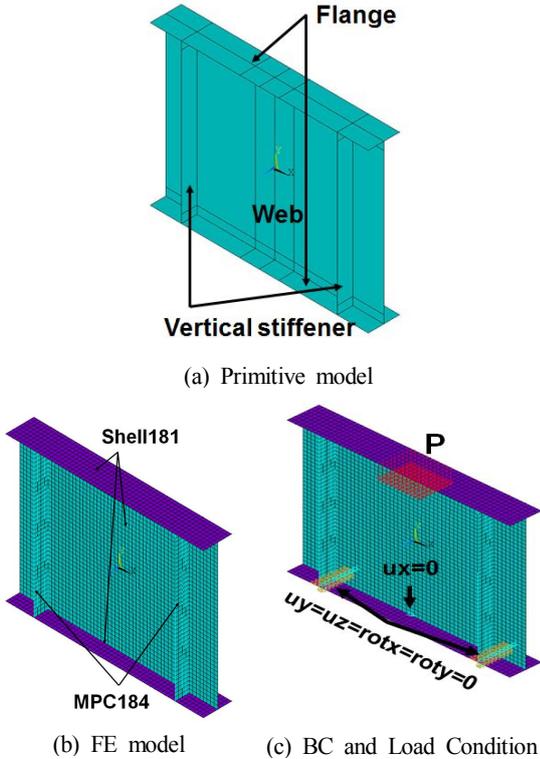


Fig. 2. Parameters and numerical model for the parametric study.

Fig. 3의 (a)에서 나타내고 있는 I형 플레이트 거더는 웹과 상하단 플랜지를 필렛 용접(Fillet welding)으로 연결하고 (b)

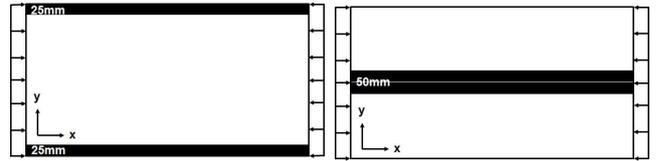
에서 나타내고 있는 I형 플레이트 거더는 T형 압출재(Extruded material)를 이용하여 중앙에서 맞대기 용접(Butt welding)으로 연결하였다. A6082-T6 합금 플레이트 거더의 연결위치 강도는 모재의 항복강도가 개략적으로 절반정도 감소하며 연화영역(Softening zone)은 25mm이다.

Ramberg-Osgood 법을 적용한 모재영역과 연결영역의 응력과 변형률 상관관계는 식(10)과 식(11)로 나타내었다.

$$\begin{cases} \epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \sigma = \sigma_{0.2} & \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} & \sigma \leq \sigma_{j0.2} \\ \sigma = \sigma_{j0.2} & \sigma > \sigma_{j0.2} \end{cases} \quad (11)$$

여기서, σ 와 ϵ 는 응력과 변형률이며, $\sigma_{0.2}$ 와 $\sigma_{j0.2}$ 는 모재와 연결위치의 0.2% 진응력이며 E 는 탄성계수이며 n 과 n_j 은 가공경화지수이다.



(a) Edge of web (b) Middle of web
Fig. 3. Joining locations of uniform load.

5. 플레이트 거더의 최종강도 예측식 추정

Table 4. The correlation analysis of F_u/F_y and λ_F

Classification		Independent variable (λ_F)	Dependent variable (F_u/F_y)
Independent variable (λ_F)	Pearson correlation	1	-0.625
	Significant probability	-	0.00
	Sum of squares	32.64	-3.83
	Covariance	0.68	-0.07
Dependent variable (F_u/F_y)	Pearson correlation	-0.625	1
	Significant probability	0.00	-
	Sum of squares	-3.83	0.19
	Covariance	-0.07	0.01

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종강도 예측식 추정

Table 5. The estimation regression equation of F_u/F_y and λ_F

Model	R^2	F	Predicted regression equation
Linear	0.391	29.497	$Y = 0.526 - 0.105X$
Algebraic	0.377	27.787	$Y = 0.594 - \ln(X)$
Inverse	0.344	24.094	$Y = -0.056 + 0.751/X$
Second order	0.391	14.438	$Y = 0.501 + 0.087X - 0.03X^2$
Third order	0.391	14.438	$Y = 0.501 + 0.087X - 0.03X^2$
Mixture	0.319	21.551	$Y = 0.892(0.573^X)$
Power	0.294	19.137	$Y = 0.852X^{-1.524}$
S	0.255	15.776	$Y = e^{-3.135 + 3.798/X}$
Growth	0.319	21.551	$Y = e^{-0.115 + 0.557X}$
Logistic	0.319	21.551	$Y = 1/(1.122(1.746^X))$
Exponential	0.319	21.551	$Y = 0.892e^{-0.557X}$

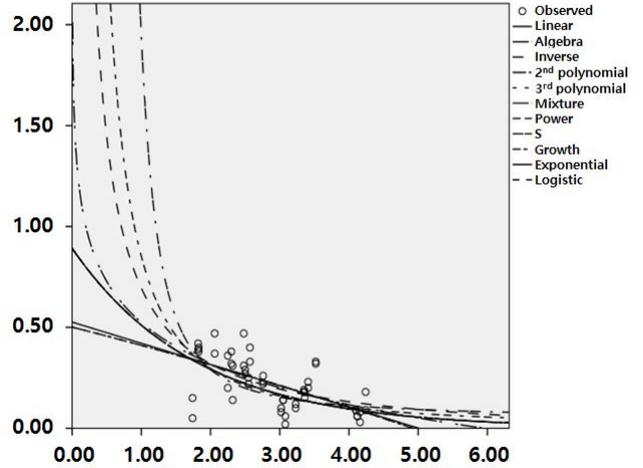
Table 4와 같이 회귀분석에 의한 결과를 최종강도 F_u/F_y 와 세장변수 λ_F 의 상관분석으로 나타내었다. 이 결과는 통계적 상관분석 결과로써 Pearson 상관계수가 -0.625(유의확률 < 0.01)로써 음(陰)의 상관관계를 내포하고 있다. 다시 말해 최종강도 F_u/F_y 가 증가할수록 세장변수 λ_F 는 낮아진다는 결과를 의미한다.

Table 5와 같이 A6082-T6 합금 플레이트 거더의 최종강도 F_u/F_y 와 세장변수 λ_F 의 추정 회귀식을 도출하기 위해 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences) 모듈을 사용하여 곡선 추정하였다. SPSS모듈 중 곡선추정으로 구할 수 있는 회귀모형은 Table 5에서 나타낸 것처럼 선형(Linear), 대수(Algebra), 역(Inverse), 2차(2nd order polynomial), 3차(3rd order polynomial), 혼합(Mixture), S, 성장(Growth), 지수(Exponential), 로지스틱(Logistic) 등과 같은 여러 회귀모형으로 정의할 수 있다. 도출 회귀모형 중 최종강도 F_u/F_y 와 세장변수 λ_F 의 상관관계가 거듭제곱 형태의 회귀모형은 역(Inverse), S, 파워(Power) 등과 같은 세 가지 형태로 나타낼 수 있다. 이중 가장 적합한 회귀모형은 파워모형으로 나타낼 수 있다. 하지만, 결정계수(Coefficient of determination, R^2 , 0.294)가 낮아 회귀식에 대한 설득력이 부족하고 유의확률(p-value, 유의확률 < 0.01)이 0.01보다 작으므로 유의하다. 회귀식에서 종속변수(Y)는 최종강도 F_u/F_y 를 의미하며 독립변수(X)는 세장변수 λ_F 를 나타내고 있다.

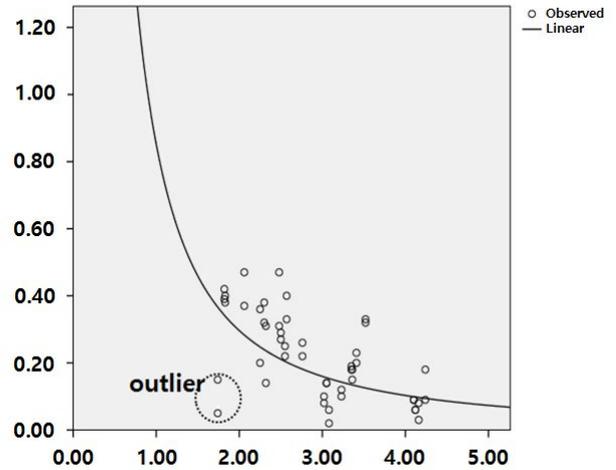
Table 5에서 나타낸 것처럼 파워모형의 결정계수 R^2 을 높이기 위해 Fig. 4의 (b)에서 나타내는 것처럼 곡선추정 선에서 가장 멀리 떨어진 이상점을 제거한 후 재 곡선추정을 수

행하면 결정계수 R^2 을 이전 회귀모형보다 두 배정도 신뢰도를 확보하여 식(12)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Y = 1.542X^{-2.027} (R^2, 0.475) \quad (12)$$



(a) Regression model



(b) Modified power model

Fig. 4. Regression analysis and modified power model.

식(12)에 A6082-T6 합금 플레이트 거더의 붕괴모드와 최종강도 특성을 반영한다면 식(13)과 같은 형태로 나타낼 수 있다. Fig. 5는 종축을 강도감소계수 $\chi(\lambda_F)$, 횡축을 세장변수 λ_F 로 나타내어 강도감소계수 $\chi(\lambda_F)$ 와 세장변수 λ_F 의 상관관계로 나타낼 수 있다.

$$\chi(\lambda_F) = \frac{1.542}{\lambda_F^{2.027}} \leq 1 \quad (13)$$

식(13)은 상용 통계프로그램(SPSS)을 이용하여 추정한 식으로써 통상적으로 결정계수 R^2 이 $0.6 \leq R^2 \leq 1.0$ 내 상존하고 있다면 충분한 신뢰도를 가져 회귀식을 추정할 수 있다. 하지만, 식(13)은 결정계수 R^2 이 0.475 이므로 A6082-T6 합금 플레이트 거더의 최종강도를 충분히 예측하는데 개략적으로 20% 정도 부족하다.

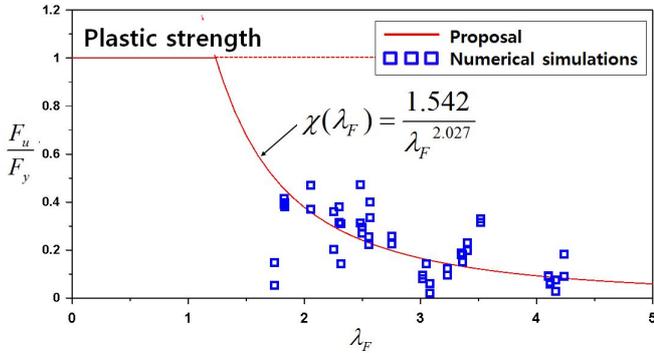


Fig. 5. The relation of predicted strength reduction factor $\chi(\lambda_F)$ and slenderness λ_F .

이러한 사항을 보완하여 충분히 예측할 수 있는 제안식을 도출하기 위해 기존 강재 플레이트 거더의 최종강도를 예측할 수 있는 Johansson and Lagerqvist(1995), Winter(1947)와 EN 1993-1-5:2005 설계코드 등 존재하고 있는 예측식 형태로 추정하여 나타내고 있다. Johansson and Lagerqvist(1995)와 Winter(1947)는 식(14)와 식(15)와 같은 2차 멱함수(power function) 형태로 각각 나타내어 제안하고 있다.

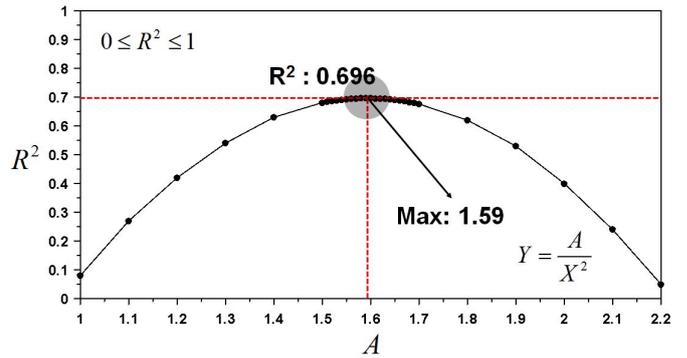
$$\chi(\lambda_F) = \frac{0.21}{\lambda_F^2} + \frac{0.22}{\lambda_F} + 0.05 \leq 1 \quad (14)$$

$$\chi(\lambda_F) = \frac{1}{\lambda_F} - \frac{0.22}{\lambda_F^2} \leq 1 \quad (15)$$

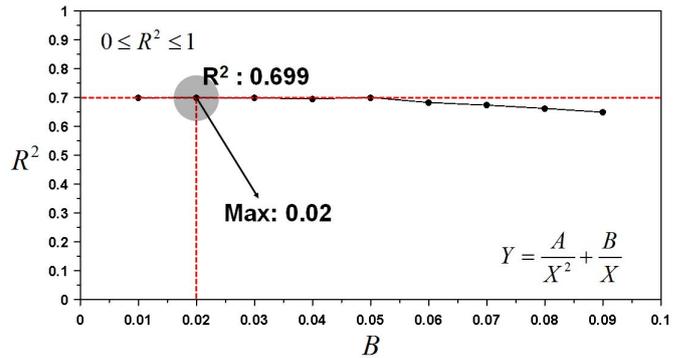
식(14)와 식(15)을 반영하여 A6082-T6 합금 플레이트 거더의 붕괴모드와 최종강도를 예측할 수 있는 제안식을 식(14), 식(15)의 2차 멱함수 형태로 식(16)을 정의하여 나타낼 수 있다.

$$Y = \frac{A}{X^2} + \frac{B}{X} + C \quad (16)$$

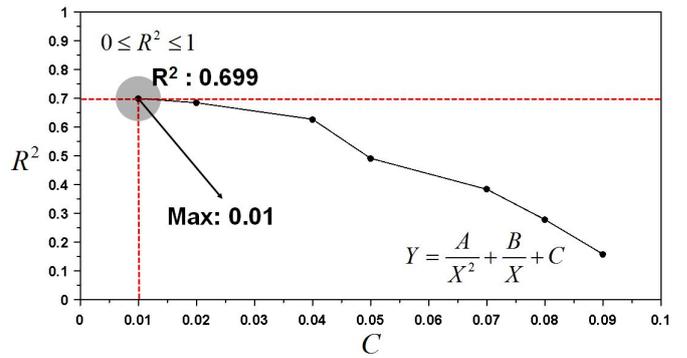
여기서, Y 는 종속변수(Dependent variable)이며 X 는 독립변수(Independent variable)이다. 각 항의 A, B, C 는 회귀계수와 상수를 의미한다.



(a) A coefficient



(b) B coefficient



(c) C coefficient

Fig. 6. Determination R^2 of the prediction formula regression coefficient.

결정계수(Coefficient of determination) R^2 은 예측식의 적합도를 재는 척도이며 종속변수의 데이터에 대하여 총변동합에 대한 변동합의 비율을 나타내는 것이다. 결정계수 R^2 은 식(17)로 나타낼 수 있다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종강도 예측식 추정

여기서, y_i 는 종속변수의 데이터이며 \bar{y}_i 는 종속변수의 데이터 평균을 의미한다. \hat{y}_i 는 회귀식의 종속변수 데이터이다.

$$Y = \frac{1.59}{X^2} + \frac{0.02}{X} + 0.01 \quad (18)$$

여기서, 회귀계수와 상수에 대한 각각의 결정계수 R^2 은 $A: 0.696, B: 0.699, C: 0.699$ 이다.

A6082-T6 합금 플레이트 거더의 파손은 재료 항복응력에 의해 결정되므로 식(19)과 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\chi(\lambda_F) = \frac{1.59}{\lambda_F^{2.0}} + \frac{0.02}{\lambda_F} + 0.01 \leq 1 \quad (19)$$

식(19)는 수치모형 결과만으로 제안한 예측식이므로 불확실성을 가지고 있다. Table 6와 Table 7에서 나타내고 있는 Robert et al.(1998)와 Robert and Shahabian(2000)의 실험모형 결과에 대해 예측식과 식(14), 식(15)의 기존 예측식과 비교하여 Fig. 8에 나타내었다.

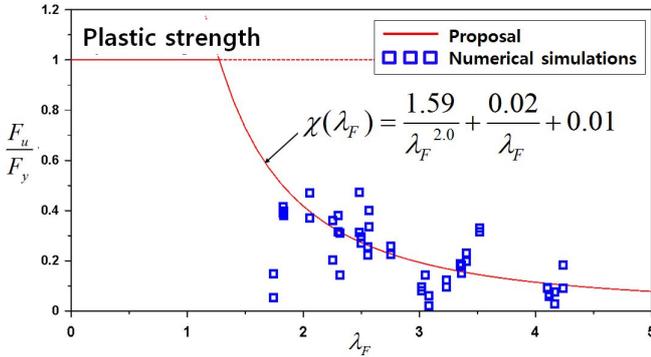


Fig. 7. The relation of predicted strength reduction factor $\chi(\lambda_F)$ and slenderness λ_F .

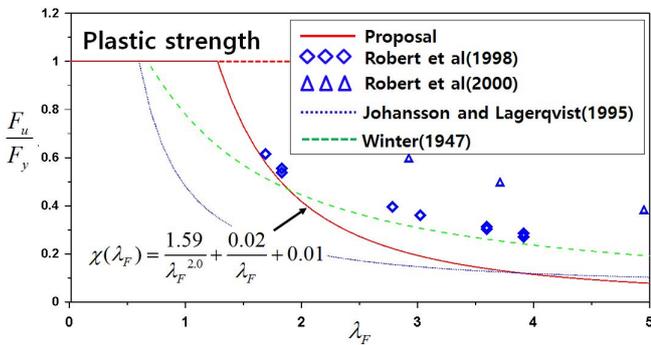


Fig. 8. Comparison of the proposed reduction factor and the test results by Robert et al.(1998), Robert and Shahabian(2000).

결정계수 R^2 의 값은 0에서 1.0사이($0 \leq R^2 \leq 1.0$)에 있으며 종속변수와 독립변수 사이에 상관관계가 높을수록 1에 가까워진다. 즉, 결정계수가 0에 가까운 값을 가지는 회귀모형은 유용성이 낮은 반면 결정계수 R^2 의 값이 클수록 유용성이 높다고 할 수 있다. 일반적으로 결정계수 R^2 이 0.6이상 ($R^2 \geq 0.6$)이면 회귀식의 적합도가 높다고 설명할 수 있다.

식(16)의 예측식의 상수 A, B, C 을 구하기 위해 Fig. 6과 같은 방법으로 회귀분석을 통해 결정계수 R^2 을 결정하였다. 회귀분석 시 독립변수 λ_F 로 종속변수 $\chi(\lambda_F)$ 로 나타내며 Fig. 6의 (a)는 식(16)에서 2차 항만 고려한 회귀분석으로 회귀계수 A 의 값을 산출하였고 (b)는 2차 항을 고정하고 1차 항을 고려한 회귀분석으로 회귀계수 B 를 산출하였다. (c)는 2차 항과 1차 항을 고정하고 상수 C 을 산출하여 식(18)과 같은 예측식을 도출하였다.

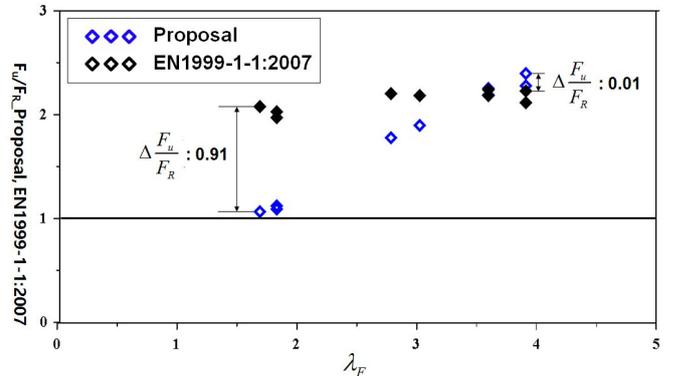


Fig. 9. $F_u/F_{R,proposal,EN1999-1-1}$ as a function of λ_F according to Robert et al.(1998).

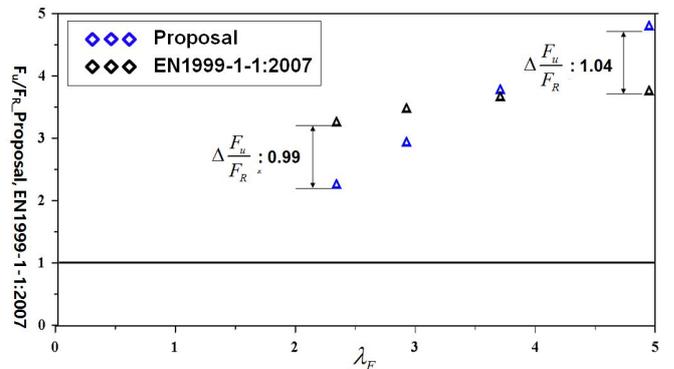


Fig. 10. $F_u/F_{R,proposal,EN1999-1-1}$ as a function of λ_F according to Robert and Shahabian(2000).

Table 6. Aluminium alloy test girders and test results(Robert et al., 1998)

Girder	a [mm]	h_w [mm]	t_w [mm]	b_f [mm]	b_f [mm]	f_{yw} [MPa]	f_{yf} [MPa]	E [MPa]	P_{EX} [kN]	s_s [mm]
AG1-P1	900	900	3.2	175	12.62	270	309	70	72	50
AG1-P2	900	900	3.2	175	12.62	270	309	70	74	50
AG2-P1	900	900	3.2	175	15.6	270	302	70	76	50
AG2-P2	900	900	3.2	175	15.6	270	302	70	80	50
AG3-P1	900	900	3.94	175	12.62	261	309	70	105	50
AG3-P2	900	900	3.94	175	12.62	261	309	70	105	50
AG4-P1	900	900	3.94	175	15.6	261	302	70	113	50
AG4-P2	900	900	3.94	175	15.6	261	302	70	113	50
AG5-P1	900	900	6.14	175	12.62	278	309	70	228	50
AG5-P2	900	900	6.14	175	12.62	278	309	70	228	50
AG6-P1	900	900	6.14	175	15.6	278	302	70	234	50
AG6-P2	900	900	6.14	175	15.6	278	302	70	241	50

Table 7. Aluminium alloy test girders and test results(Robert and Shahabian, 2000)

Girder	a [mm]	h_w [mm]	t_w [mm]	b_f [mm]	b_f [mm]	f_{yw} [MPa]	f_{yf} [MPa]	E [MPa]	P_{EX} [kN]	s_s [mm]
PG1-1	600	600	4.1	200	12.5	343	257	70	220	50
PG2-1	900	900	3.1	300	15.6	285	254	70	113	50
PG3-1	900	600	3.94	200	10.1	282	264	70	120	50
PG4-1	900	900	3.2	200	9.9	250	293	70	52	50

Fig. 9와 Fig. 10은 Table 6과 Table 7에서 나타내고 있는 Robert et al.(1998)와 Robert and Shahabian(2000)의 실험모형 결과를 예측식 결과와 EN 1999-1-1:2007 설계코드 결과를 등비관계로 나타내어 세장변수 λ_F 에 따른 영향을 각각 검토하였다.

6. 결론

본 논문은 패치로딩을 받는 알루미늄 합금(A6082-T6) 플레이트 거더의 최종강도 예측식을 제안하고자 수치모형을 이용하여 해석결과에 관한 회귀분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 논문의 예측식은 수치모형의 세장변수와 유한요소해석으로부터 도출된 최종강도간의 상관관계를 표현한 것으로서 패치로딩을 받는 알루미늄 합금 플레이트 거더의 최종강도를 합리적으로 예측할 수 있다.
- (2) 기 실험모형결과와 EN 1999-1-1:2007 설계코드 결과를 제안 예측식과 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였

다. 세장변수 λ_F 가 0-2.3 일 경우 약 9% 정도의 오차가 발생하며 세장변수 λ_F 가 2.3-4.0 일 경우 약 1-2% 정도의 오차가 발생하였다. 이는 제안 예측식 결과가 EN1999-1-1:2007설계코드 결과에 대해 양호하며 예측식의 적정성이 매우 합리적으로 예측할 수 있다.

추후 알루미늄 합금을 적용한 플레이트 거더의 건조방법, 재료특성 등을 고려하여 A6082-T6 합금 플레이트 거더의 최종강도 예측식에 대한 수정 및 제안이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Amdahl, J., N. K. Langhelle and S. Lundberg(2001), Aluminium plated structure at elevated temperatures, Proceedings of OMAE 2001, 20th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, pp. 1-8.
- [2] Balaz, I. and Y. Kolekova(2014), Critical buckling stress of patch loading, Engineering MECHANICS, Volume 21, No. 2,

pp. 83-89.

- [3] Evans, H. R. and M. J. Hamoodi(1987), The collapse of welded aluminium plate girders-an experimental study, *Thin-Walled Structures*, Volume 5, Issue 4, pp. 247-275.
- [4] Johansson, B. and O. Lagerqvist(1995), Resistance of plate edges to concentrated forces, *J. Construct. Steel Research* 32, pp. 69-105.
- [5] Oh, Y. C. and D. G. Bae, J. Y. Ko(2014), Basic Research for Resistance Prediction of Aluminium Alloy Plate Girders Subjected to Patch Loading, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 20, No. 2, pp. 218-227.
- [6] Robert, 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.
- [7] Robert, T. M. and F. Shahabian(2000), Design procedures for combine shear and patch loading of plate girders, *Pro. Instn Civ, Engrs Structs & Bldgs*, pp. 219-225.
- [8] Winter, G.(1947). "Strength of thin steel compression flanges." *Transactions, ASCE*, 112, pp. 527-576.
- [9] Zetlin, L.(1955), Elastic instability of flat plates subjected to partial edge loads, *proceedings, ASCE*, Vol. 81, Separate paper No. 795, pp. 1-24.

Received : 2015. 08. 31.

Revised : 2015. 10. 12.

Accepted : 2015. 10. 27.