

저니켈 듀플렉스계 스테인리스강 2행1열 일면전단 볼트접합부 구조거동에 대한 유한요소해석

홍종화¹ · 김태수^{2*}

¹사원, (주)무한파트너스, 구조설계팀, ²교수, 한밭대학교, 건축공학과

Numerical Analysis on Structural Behaviors of Single Shear Two-Bolted Connection with Lean Duplex Stainless Steel

Hong, Jong Hwa¹, Kim, Tae Soo^{2*}

¹Structural Design Team, Moohan Partners Co., Ltd., Seoul, 06781, Korea
(Former Student, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University)

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

Abstract - Since stainless steel has many advantages such as excellent durability, ductility and corrosion resistance compared to those of carbon steel, recently, the need of stainless steel has been increased as a structural material in a variety of structural members and industrial fields. However, stainless steels are not included as the structural materials in Korean Design Standards (KDS 41 31 00) and the corresponding design standards are not specified. In this paper, finite element analysis has been performed to investigate the ultimate strength and curling effect based on the previous test results on duplex stainless steel (STS329FLD) single shear two-bolted connection. It is known that in both test and analysis, curling(out-of-plane deformation) occurred in specimens with a long end distance and it reduced the strength of curled specimen. Also, additional parametric analysis was conducted according to initial imperfection of connected plate and analysis results considering initial imperfection provided a better strength prediction of STS329FLD bolted connection.

Keywords - Duplex stainless steel, Single shear, Bolted connection, Curling, Strength reduction, Initial imperfection, Finite element analysis

1. 서론

국내외에서 스테인리스강은 탄소강에 비해 우수한 내식성, 연성, 내화성, 미적특성 등의 많은 장점들을 지니고 있어 건축구조물의 내·외장재의 비구조재뿐만 아니라 주요 구조부재로써 사용량이 꾸준히 증가하고 있다. 기존에 사용되고 있었던 오스테나이트계 및 페라이트계 스테인리스강은 장기적인 유지관리 측면에서 유리함에도 불구하고 가격과 항

복강도 측면에서 탄소강에 비해 경쟁력이 떨어져 건축물의 초기설계단계에서 특수목적 이외에 구조재료로 선정되지 못하고 있다. 최근에 고가원소인 니켈(Ni)함유량을 0.5% - 1.5%까지 줄이고 강도증진을 위해 질소(N)를 0.2% - 0.3% 함유시켜 오스테나이트(austenite)와 페라이트(ferrite) 조직을 50:50 비율로 구성된 듀플렉스계(duplex) 스테인리스강인 STS329FLD가 개발되어 한국산업규격(KS)에 2015년 등재되었다. 국내에서는 냉간성형 오스테나이트계 스테인리스강과 페라이트계 스테인리스강에 대한 볼트접합부와 용접접합부에 대한 실험 및 해석적 연구가 수행되어 탄소강과 상이한 재료적 성질을 반영한 구조적 거동과 수평내력평가식을 제안해왔다^[1-5]. 가장 많이 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인리스강 중에 대표적인 STS304은 KS D 3698(냉간압연 스테인리스 강판 및 강대)에서 최소항복강도, 인장강도 및 연신율은 각각 205 MPa, 520 MPa, 40%이지만 2015

Note.-Discussion open until October 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 07, 2020; revised March 08, 2020; approved on March 15, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-1121 Fax. +82-42-821-1590

E-mail. tskim@hanbat.ac.kr

년 KS에 등재된 듀플렉스계 스테인리스강은 최소항복강도, 인장강도 및 연신율은 450 MPa, 620 MPa, 30 %로 미세구조 조직과 화학성분(Cr, Ni, Mo, N)의 함유량의 차이로 재료적 성질이 다르게 나타난다. 탄소강뿐만 아니라 다른 계열의 스테인리스강과의 다른 재료적 성질로 국내에서 생산되는 냉간성형 듀플렉스계 스테인리스강 평판으로 제작된 볼트 접합부(2행1열 및 2행2열 볼트배열, 공칭두께 3.0 mm)^{[6],[7]}과 모재블록전단파단 용접접합부(공칭두께 1.5 mm)^[8]에 대한 실험연구가 수행되었다. 연단거리가 긴 일면전단 볼트접합부에서 박판에 대한 볼트의 지압작용으로 면외변형(판두께방향, 즉 하중직각방향 변형, curling)이 발생하였고 5 % - 20 % 범위의 내력저하 현상이 관찰되었다. 모재 블록전단파단 용접접합부에서는 현행 미국강구조학회 기준식(AISC 2016)^[9], 유럽 EC3^[10]와 탄소강을 대상으로 한 Oosterhof and Driver^[11]와 Topkaya^[12]의 제안식에 의해 재료성질의 차이에 따른 응력삼축효과와 전단응력분포를 충분히 고려하지 못하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 저니켈 고강도 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD) 2행1열 일면전단 볼트접합부의 실험결과^[6]를 토대로 하중방향 연단거리와 측단거리가 긴 실험체에서 관찰된 하중직각방향(판두께방향)으로의 면외변형의 영향과 구조거동을 예측하기 위한 유한요소해석 모델을 제시하고 타당성을 확인하고자 한다. 추가적으로 면외변형을 구속한 해석모델과 비교하고 면외변형에 의한 내력저하정도를 정량적으로 평가하고 평판의 초기변형(initial imperfection)량의 영향을 조사하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 기존실험 요약

2.1 실험체 계획 및 방법

저니켈 고강도 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD) 2행1열 일면전단 볼트접합부에서 하중방향 연단거리(24 mm $\leq e \leq 60$ mm)에 따른 파단형태와 최대내력을 조사하기 위해 공칭두께(t_n) 3.0 mm인 평판으로 5개의 실험체를 계획 및 제작하였다. 실험체는 볼트의 전단파단이 아닌 접합평판의 파단을 유도하기 위하여 고장력볼트를 사용하였고 Fig. 1과 같이 하중직각방향의 순단면 인장파단이 아닌 볼트간 인장파단과 하중방향 전단파단의 조합인 블록전단파단이 되도록 하기 위해 측단거리(b)를 60 mm로 계획하였다. 볼트직경(d)은 12 mm, 볼트구멍직경(ϕ)은 13 mm, 게이지(g)는 36 mm

로 하였다. 접합부 실험체는 Fig. 2와 같이 실험측(test part)을 중간연결재(coupling part)와 고정체(rigid part)에 볼트 체결을 실시한 후, 만능시험기의 상부 물림부에 고정시켜 단순 인장실험을 수행하였다.

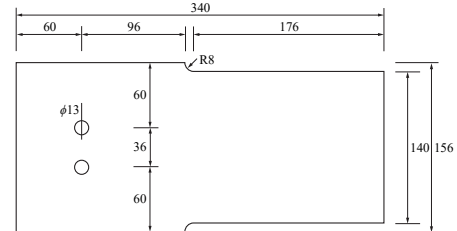


Fig. 1. Geometry of test part

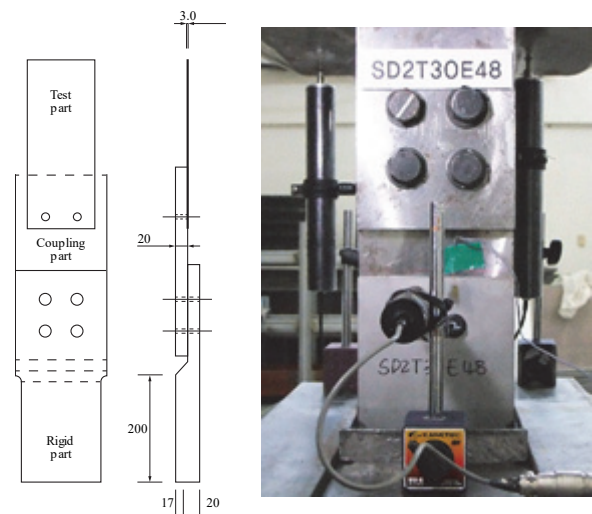


Fig. 2. Assembly and set-up of specimen

2.2 재료인장시험 및 결과

볼트접합부에 사용된 강종인 STS329FLD의 평판두께 3 mm에 대해서 기계적인 성질을 파악하기 위하여 재료인장시험을 수행하였다. 재료인장시험 결과는 Table 1에 정리하였다. 재료인장시험 결과, 평균평판두께는 2.83 mm로 측정되었고, 평균항복강도(F_y)는 512.65 MPa, 인장강도(F_u)는 734.17 MPa, 탄성계수는 196.35 GPa, 항복비는 47.87 %로 나타났고 KS D 3698(냉간 압연 스테인리스 강판 및 강대)에서 규정하는 STS329FLD의 최저 항복강도(450 MPa), 최저 인장강도(620 MPa), 연신율(30 %)을 초과해 만족하는 것으로 나타났다. Kim and Kang^[13]의 2행1열 탄소강(SS400) 일면전단 볼트접합부의 재료인장시험결과인 평균항복강도와 인장강도인 328.84 MPa, 512.65 MPa보다 각각 1.56배, 1.60배 높게 나타났다.

2.3 접합부 실험결과

듀플렉스계 스테인리스강 5개의 일면전단 볼트접합부 실험결과(실측두께, 면외변형 발생여부, 실험종료시점에서 파단형태, 최대내력시점에서 파단형태 및 최대내력)를 Table 2에 정리하였다. 접합부 실험체명, 예를 들어 SD2T30E24에서 ‘SD’는 duplex stainless steel를, ‘2’는 볼트 개수를, ‘T30’은 평판두께 3.0 mm를, ‘E24’는 하중방향연단거리($e = 24$ mm)를 의미한다. 또한, 실험체의 실험종료시점에서의 파단형태와 면외변형 양상을 Fig. 3에 나타냈다. 실험결과, 하중방향 연단거리(e)가 36 mm 이하인 실험체의 경우(SD2T30E24, SD2T30E30, SD2T30E36), 면외변형의 발생 없이 하중방향

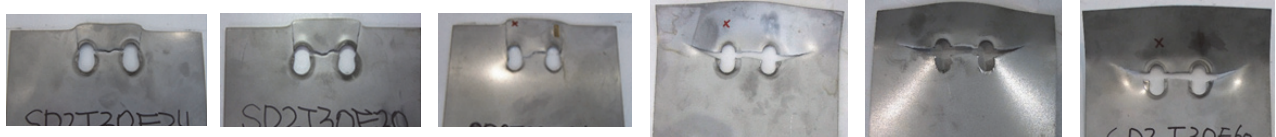
순단면파단과 하중직각방향의 전단파단의 조합인 전형적인 블록전단파단(block shear fracture, BS)이 발생하였으며, 하중방향 연단거리가 증가함에 따라 최대내력(P_{ue})도 증가하는 경향을 보였다. 하중방향 연단거리가 48 mm 이상의 실험체의 경우(SD2T30E48, SD2T30E60), Fig. 3(d), 3(e), 3(f)와 같이 면외변형(curling)이 발생하였고, 면외변형에 의해 최대내력이 결정되었다. 또한, 실험결과와 하중-변위 곡선에서 면외변형의 발생 및 진전시점에서 급격한 내력저하가 관찰되었고 강제변위가 증가함에 따라 볼트 간 인장파단과 2차적으로 하중직각 방향 연단으로 추가적인 인장파단이 발생하였다. 면외변형의 영향으로 하중방향 연단거리가 가장 큰 SD2T30E60 실험체는 오히려 내력이 저하되었다.

Table 1. Material test results

Coupon	Actual plate thickness t_e [mm]	Young's modulus E [GPa]	Yield stress σ_y [MPa]	Tensile strength σ_u [MPa]	Yield ratio σ_y/σ_u YR [%]	Elongation EL [%]
SDT30-1	2.81	194.85	515.38	736.05	70.02	48.10
SDT30-2	2.85	200.56	513.66	732.76	70.10	46.70
SDT30-3	2.82	193.64	508.92	733.71	69.36	47.78
Average	2.83	196.35	512.65	734.17	69.83	47.87
COV	-	0.019	0.007	0.002	0.006	0.015

Table 2. Test results

Specimen	End distance e [mm]	Actual plate thickness t_e [mm]	Curling	Fracture mode at test end	Fracture mode at ultimate state	Ultimate strength P_{ue} [kN]
SD2T30E24	24	3.02	-	Block shear fracture (BS)	Tensile fracture between two bolts	108.35
SD2T30E30	30	2.99	-			120.58
SD2T30E36	36	2.98	-			128.69
SD2T30E48	48	3.00	○	Tensile fracture +curling	Curling	138.65
SD2T30E60	60	3.02	○			132.89



(a) SD2T30E24 (b) SD2T30E30 (c) SD2T30E36 (d) SD2T30E48 (e) SD2T30E48 (f) SD2T30E60

Fig. 3. Fracture shapes at test end

3. 유한요소해석 및 면외변형의 영향

3.1 볼트접합부 모델링

2장의 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD) 2행1열 일면전단 볼트접합부의 재료시험 및 접합부 실험결과를 토대로 볼트접합부의 파단형태와 최대내력을 예측하기 위한 해석모델을 비선형 유한해석프로그램인 ABAQUS를 사용하여 구축하였다. 기존연구인 페라이트계 스테인리스강과 오스테나이트계 스테인리스강 볼트접합부의 해석모델^{[4],[5]}을 참고해 Fig. 4와 같이 접합부 모델을 설정하였다. 2행2열의 4개를 갖는 볼트 접합부에서는 2열의 볼트군에 의해 하중방향의 힘을 배분하여 힘을 전달하여 와셔의 면외변형 구속에 기여하는 정도가 낮았으나 본 연구의 2행1열 볼트접합부에서는 대해서는 와셔의 면외변형 구속을 고려하기 위하여 Fig. 4에서와 같이 와셔직경만큼 스케치하여 두께방향의 변형을 구속시켰다. 해석모델의 전체길이는 길이에 따른 최대내력 및 파단형태에는 영향을 주지 않는다는 것을 고려하여 150 mm로 모델링하였다^{[4],[5]}. 해석요소는 3차원 솔리드 저감적분요소인 C3D8R을 적용하였으며 볼트와 구멍벽사이의 마찰력은 고려하지 않았다. 접합부의 경우 손조임하였고 마찰형 접합부가 아닌 초기장력을 적용하지 않은 지압형 볼트접합으로 모델링하였다. 해석시간을 절감시키기 위해 대칭조건을 적용하여 볼트접합부의 절반만 모델링하였고 볼트의 경우는 변형이 발생하지 않는 강체로 하였다. Fig. 4의 좌측을 고정단으로 하고 볼트상부에 참조점(RP: reference point)을 지정하고 강제변위를 가하여 하중을 가하는 것으로 하였다.

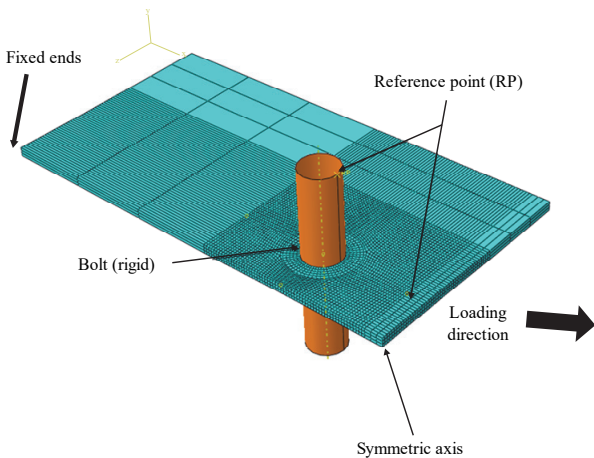


Fig. 4. FE analysis model and conditions

재료모델에서 재료인장시험으로부터 얻어진 강재의 탄성계수(E), 항복강도(σ_y), 인장강도(σ_u) 등의 재료적 성질은 Table 2의 SDT30-3을 사용하였다. 해석모델의 재료데이터는 인장 시험편의 실험결과로 얻어진 공칭응력도-공칭변형도($\sigma_n - \epsilon_n$)값을 하중 및 하중직각방향의 인장시험편의 단면적의 변화가 고려된 진응력도-진변형도($\sigma_t - \epsilon_t$) 값으로 변환하여 사용하였다(Fig. 5). 그리고 탄성영역이후의 소성거동은 전체 변형도(ϵ_t)에서 탄성변형도(ϵ_{el})를 공제한 소성변형도(ϵ_{pl})를 입력하였다.

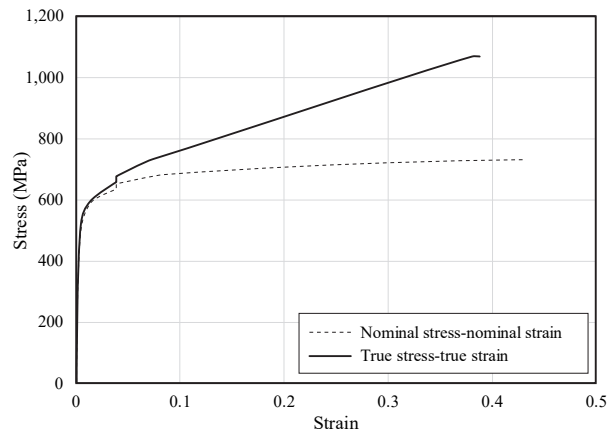


Fig. 5. Stress-strain curves of SDT30-3 for analysis model

3.2 해석결과 및 비교

실험결과와 해석결과와 최대내력, 실험종료시점에서 파단형태, 면외변형 발생여부를 비교하여 Table 3에 정리하였다. 최대내력시점에서의 해석결과로부터 얻은 파단형태 및 응력분포를 Fig. 6에 나타냈다. 해석결과, SD2T30E36의 실험체를 제외하고는 실험종료시점에서 동일한 파단양상을 보였고 연단거리가 48 mm 이상인 실험체의 경우 Fig. 3(d)와 Fig. 3(e)의 실험결과와 동일하게 면외변형이 발생하였다. SD2T30E30 실험체와 SD2T30E36 실험체의 경우 실험내력에 비해 해석내력이 각각 10%, 7% 높게 나타났고 하중방향 연단거리가 가장 큰 SD2T30E60 실험체의 경우 면외변형의 영향에 의한 내력저하로 실험과 해석에서 유사한 내력을 보였다. Kim *et al.*^[14]의 연구에 의하면 박판의 일면전단 볼트접합부의 경우 평판의 초기변형에 의해 면외변형 발생여부와 내력저하정도가 달라진다는 것을 착안하여 4장에서는 볼트접합부의 평판에 초기변형을 반영하여 유한요소해석을 수행하였다.

Table 3. Comparison of test results and analysis results

Specimen	Experiment result			Analysis result			Strength ratio P_{ua}/P_{ue}
	Ultimate strength P_{ue} [kN]	Fracture shape at test end	Curling	Ultimate strength P_{ua} [kN]	Fracture shape at analysis end	Curling	
SD2T30E24	108.35	BS	-	111.59	BS	-	1.03
SD2T30E30	120.58	BS	-	132.93	BS	-	1.10
SD2T30E36	128.69	BS	-	138.09	BS+ curling	○	1.07
SD2T30E48	138.65	Tensile fracture +curling	○	140.48	Tensile fracture +curling	○	1.01
SD2T30E60	132.89		○	128.70		○	0.97
Average							1.04

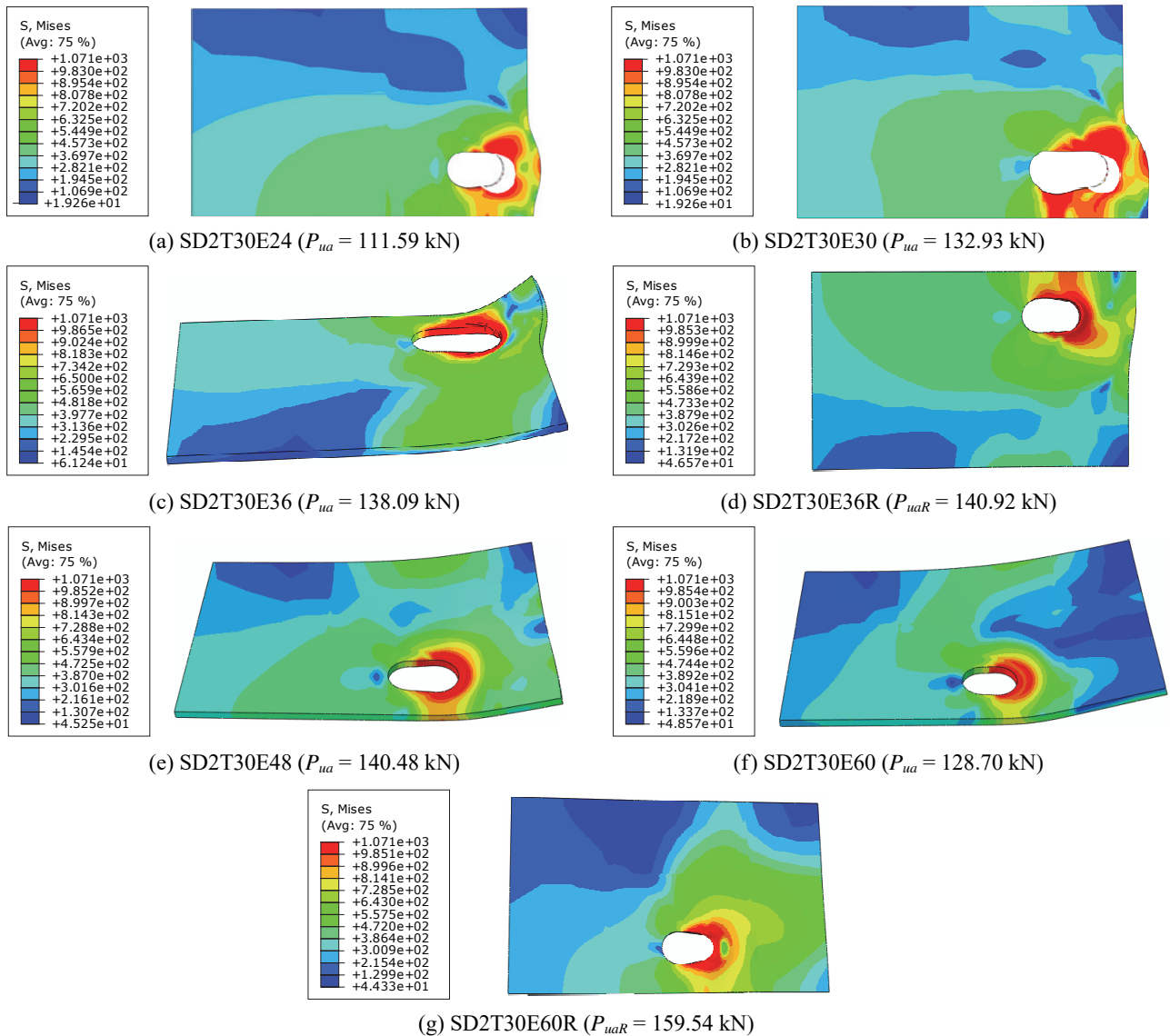


Fig. 6. Stress distribution and deformed shape of analysis results(ultimate strength) in SD2T30 series

3.3 면외변형의 영향

Table 2의 실험결과에서 하중방향 연단거리가 48 mm와 60 mm인 일면전단 볼트접합부에서 발생한 면외변형에 의해 내력저하가 관찰되었고, 해석결과에서도 Table 3에서와 같이 36 mm 이상인 접합부에서 면외변형이 발생하였다. Table 3의 일면전단 볼트접합부의 실험 및 해석에서는 Fig. 2와 같이 두께방향(하중직각방향)으로 면외변형의 구속이 없기 때문에 하중방향 연단거리가 길어짐에 따라 면내변형의 한계를 초과하여 볼트몸체에 의한 판의 지압으로 판의 면외방향으

로 국부좌굴이 발생하였다. 본 절에서는 면외변형에 의한 내력저하정도를 평가하기 위해서 두께방향의 변위(U3)를 구속한 해석모델(model with restrained curling)을 구축하여 추가적인 유한요소해석을 수행하였다. Table 4의 면외변형을 구속하지 않은 모델의 해석결과와 면외변형을 구속한 모델(실험체명에 ‘R’을 표기)을 해석결과를 비교하여 Table 5에 정리하였고, 해석결과와 실험결과로부터 얻어진 하중-변위 곡선은 Fig. 7에 나타났다. 이 연구에서는 접합부의 파단형태, 면외변형여부 및 최대내력에 초점을 두어 해석모델을 구축했다. 해석결과, 두께방향 구속으로 인하여 모든 실험체에서

Table 4. Strength comparison of specimen with free edges and specimen with restrained curling by additional analysis results

Specimen	Analysis result				Strength ratio P_{ua}/P_{uaR}
	Ultimate strength P_{ua}, P_{uaR} [kN]	Fracture shape at analysis end	Fracture shape at ultimate state	Curling	
SD2T30E24	111.59	BS	BS	-	-
SD2T30E30	132.93	BS	BS	-	-
SD2T30E36	138.09	BS+ curling	BS	○	-
SD2T30E48	140.48	Tensile fracture +curling	Curling	○	-
SD2T30E60	128.70		Curling	○	-
SD2T30E24R	113.93	BS	BS	-	0.98
SD2T30E30R	127.50	BS	BS	-	1.04
SD2T30E36R	140.92	BS	BS	-	0.97
SD2T30E48R	150.64	BS	BS	-	0.93
SD2T30E60R	159.54	BS	BS	-	0.81

Table 5. Comparison of analysis results and variable analysis results

Specimen	Test strength P_{ue} [kN]	Analysis result of model with no initial imperfection			Additional analysis result for initial imperfection (IP)					Test-analysis strength ratio P_{ualIP}/P_{ue}		
		Ultimate strength P_{ua} [kN]	Curling	Fracture shape at analysis end	Ultimate strength			Curling	Fracture shape at analysis end	$\delta = L/50$ (3.0 mm)	$\delta = L/100$ (1.5 mm)	$\delta = L/200$ (0.75 mm)
					P_{ualIP1} [kN]	P_{ualIP2} [kN]	P_{ualIP3} [kN]					
SD2T30E24	108.35	111.59	-	BS	111.91	111.03	111.37	-	BS	1.03	1.02	1.03
SD2T30E30	120.58	132.93	-	BS	124.07	125.67	129.89	○	BS	1.03	1.04	1.08
SD2T30E36	128.69	138.09	○	BS+ curling	129.79	131.81	134.71	○	BS	1.01	1.02	1.05
SD2T30E48	138.65	140.48	○	Tensile fracture+ curling	124.72	129.92	137.14	○	BS	0.90	0.94	0.99
SD2T30E60	132.89	128.70	○	BS	116.33	119.92	120.44	○	BS	0.88	0.90	0.91

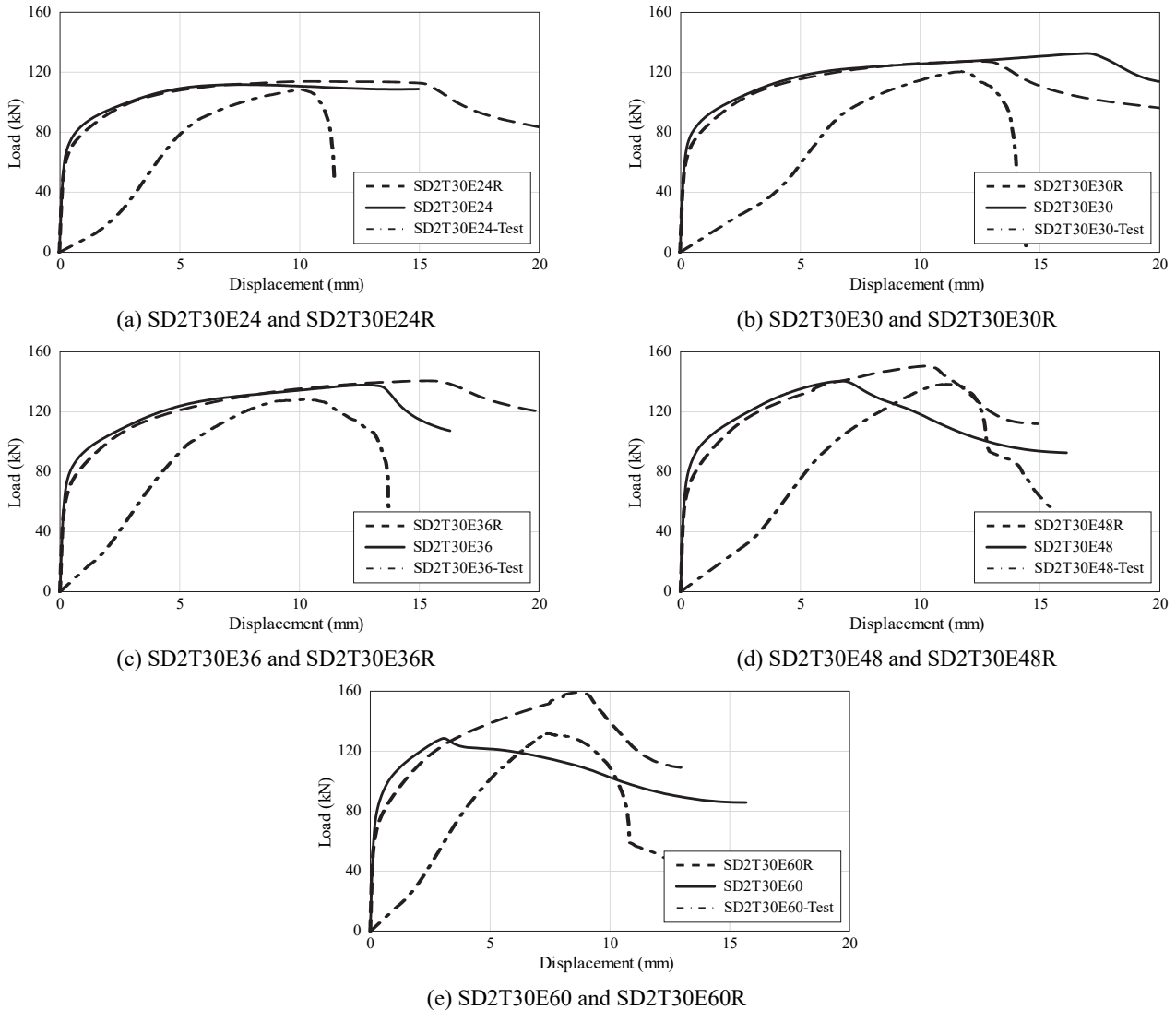


Fig. 7. Load-displacement curves in analysis model, additional analysis(R) model and test results

면외변형이 발생하지 않았다. 하중방향 연단거리가 24 mm - 36 mm인 접합부에서는 면외변형을 고정한 모델과 고정하지 않은 모델의 내력비(P_{ua}/P_{uaR})는 0.97 - 1.04의 범위로 나타났으며, 특히 실험에서는 면외변형이 발생하지 않았던 SD2T30E36은 해석에서는 Fig. 7(c)와 같이 최대내력 이후에 면외변형이 발생하였고 최대내력에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 확인되었다. Table 4, Fig. 7(d), Fig. 7(e)에서 알 수 있듯이 면외변형(curling)에 의해 접합부의 최대내력이 결정된 SD2T30E48과 SD2T30E60 접합부는 면외변형을 구속한 모델인 SD2T30E48R과 SD2T30E60R의 최대내력과 비교해 보았을 때 각각 7%, 19% 내력이 저하되는 것으로 나타났다. 본 연구와 동일한 평판두께와 볼트배열, 볼트직경, 피치와 게이지를 갖는 Kim *et al.*^[5]에 의한 페라이트계 스테인리스

강(STS430) 2행1열 일면전단 볼트접합부에서는 면외변형에 의해 6% - 33%의 범위, Kim and Lim^[4]에 의한 오스테나이트계 스테인리스강(STS304) 2행1열 일면전단 볼트접합부에서는 면외변형에 의해 11% - 26% 범위의 내력이 저하되었다. 스테인리스강의 계열에 따라 항복강도, 인장강도, 항복비 및 연신율 등의 차이에 의해 연단거리 조건과 면외변형 발생에 따른 내력저하정도가 상이한 것을 알 수 있다.

4. 접합평판의 초기변형 영향

냉간성형 오스테나이트계 스테인리스강(평균항복강도, 300.5 MPa, 평균인장강도, 855.22 MPa, 평균탄성계수

201 GPa)을 대상으로 Kim *et al.*^[14]은 일면전단 볼트접합부 (1행1열, 1행2열, 2행2열 볼트배열)에 대해 평판의 초기변형형(initial imperfection) 형태와 변형크기를 초기변형이 박판의 일면전단 볼트접합부에 미치는 영향을 조사하였다.

본 연구의 대상 강종은 기존연구인 오스테나이트계 스테인리스강^[14]과 재료적 성질과 볼트배열이 다른 듀플렉스계 스테인리스강 2행1열 일면전단 볼트접합부에서 평판의 초기변형 크기에 따른 면외변형 발생 및 내력을 비교하기 위하여 Fig. 8과 같은 초기변형 형태와 크기(δ)를 적용하여 추가적인 해석을 수행하였다. 해석요소와 재료의 기계적 성질은 기존해석과 동일하게 설정하였다. 초기변형크기(δ)는 접합부의 해석모델 길이(L)인 150 mm를 기준으로 Table 5와 같이 $L/50, L/100, L/200$ 로 3가지 크기에 대해 모델링을 하

였다. 초기변형을 도입하지 않은 접합부와 3종의 초기변형을 적용한 접합부의 해석결과를 Table 5에, 하중-변위 곡선은 Fig. 9에 정리하였다.

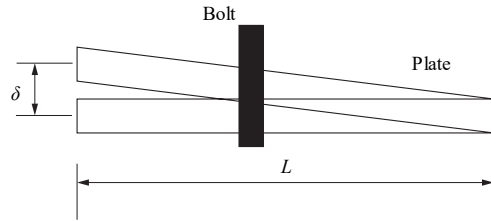


Fig. 8. Initial imperfection shape

각 접합부모델에 3종의 초기변형을 반영한 해석결과, 초기변형이 고려되지 않은 일면전단 볼트접합부에서는 하중

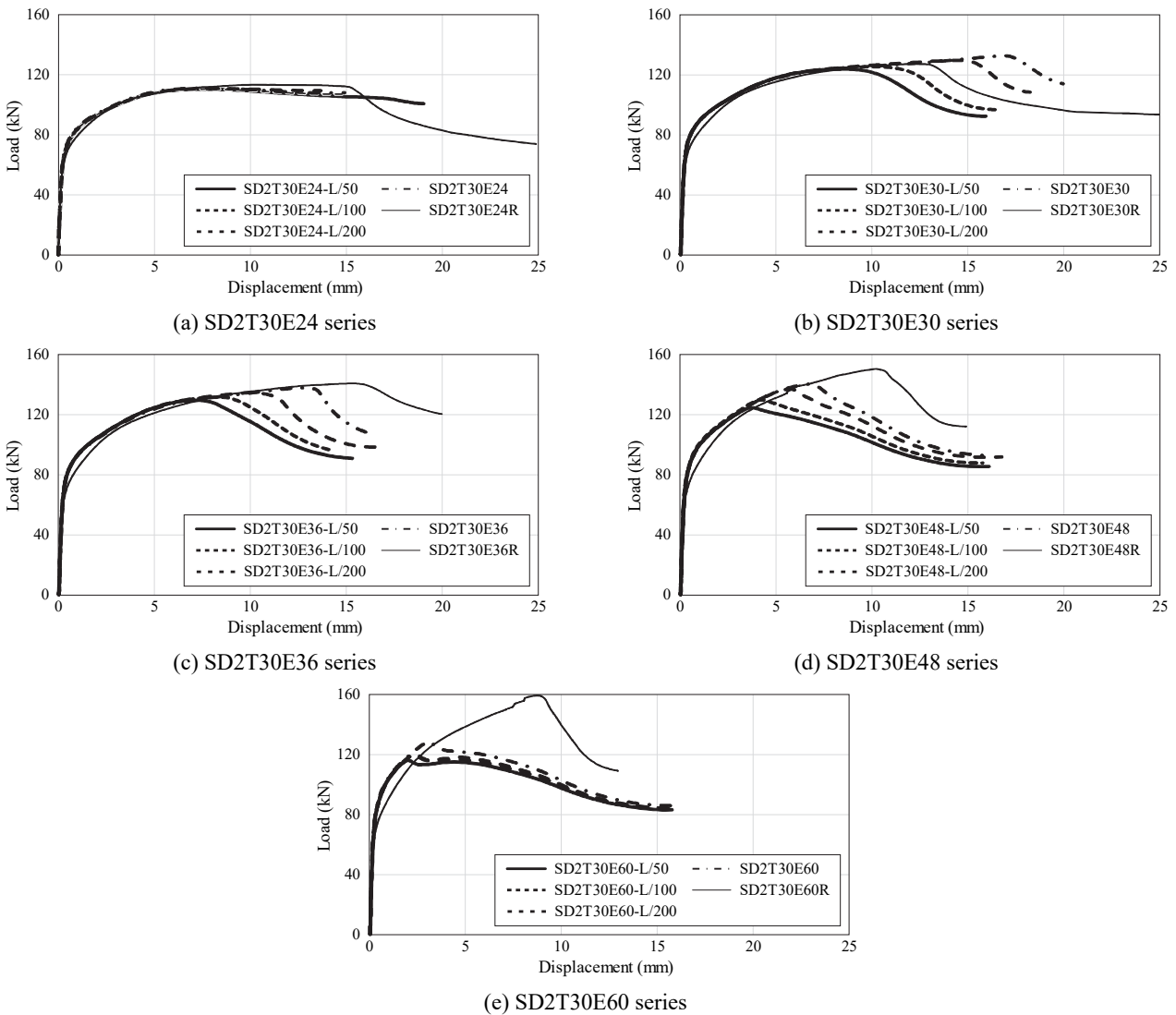


Fig. 9. Load-displacement curves of parametric analysis results

방향 연단거리가 36 mm 이상인 경우에 면외변형이 관찰되었으나 초기변형을 도입한 접합부에서는 하중방향 연단거리가 30 mm 이상인 경우에 해석종료시점에서 면외변형이 발생하였다. 초기변형 도입여부에 상관없이 하중방향 연단거리가 24 mm인 접합부 SD2T30E24는 면외변형이 발생하지 않았고 최대내력도 유사한 것으로 나타났다. 하중방향 연단거리가 30 mm 이상인 접합부에 대해서 초기변형 크기가 증가함에 따라 면외변형 발생에 따른 내력저하폭이 증가하여 최대내력이 저하하는 경향을 보였다. 초기변형 크기 $L/200(0.75 \text{ mm})$ 을 적용한 해석내력(P_{ualP})과 실험내력(P_{ue})을 비교한 결과 평균 최대내력비(P_{ualP}/P_{ue}) 1.01로 초기변형을 도입하지 않은 해석모델의 최대내력비(1.04)보다 예측정도가 개선된 것을 알 수 있다.

5. 결론

저니켈 고강도 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD) 2행1열 일면전단 볼트접합부에 대한 기존 실험을 토대로 유한요소해석을 구축하고 해석모델의 타당성을 검증하였다. 기존실험에서 하중방향 연단거리가 긴 접합부에서 하중직각방향(평판두께 방향)으로 면외변형이 발생하였고 접합부의 내력저하에 영향을 미치는 것으로 나타났고 면외변형에 따른 내력저하 정도와 평판의 초기변형이 면외변형 발생과 최대내력에 미치는 영향을 조사하기 위해 변수해석을 수행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 유한요소해석 모델을 제시하였고 실험과 동일하게 하중방향 연단거리가 48 mm 이상인 접합부에서 면외변형에 의해 최대내력의 저하가 발생되었다. 면외변형을 구축한 해석모델의 내력과 비교한 결과, 면외변형에 의해 7% - 19% 범위로 내력이 저하되었다. 면외변형이 발생하지 않았거나 면외변형을 구축한 접합부에서는 볼트간 인장파단과 하중방향의 전단파단의 조합인 블록전단파단이 발생하는 것으로 나타났고 면외변형이 내력저하에 영향을 준 접합부는 볼트간 인장파단 전에 최대내력이 면외변형에 의해 결정되었다. 듀플렉스계 스테인리스강 2행1열 일면전단 볼트접합부는 기존의 오스테나이트계 및 페라이트계 스테인리스강 일면전단 볼트접합부에 관한 연구결과에

서 나타난 면외변형에 의한 내력저하 크기가 볼트 배열과 재료적 성질의 차이로 다르게 나타났다.

- (2) 박판 일면전단 볼트접합부에서 초기변형이 면외변형의 발생여부와 면외변형에 의한 내력저하 정도에 미치는 영향을 조사하기 위해 기존의 오스테나이트계 스테인리스강 볼트접합부에 관한 연구에서 적용한 초기변형 양상과 크기를 적용하여 추가적인 유한요소해석을 수행하였다. 실제평판은 제작 및 가공시에 초기변형이 존재하므로 평판의 초기변형을 고려하지 않은 해석모델보다 초기변형을 고려한 해석모델의 내력이 실험내력과 근접하는 것으로 나타났다. 추후, 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD)의 재료적 특성을 고려한 2행1열 일면전단 볼트접합부의 면외변형 발생조건과 면외변형의 영향을 고려한 내력평가식을 고찰할 필요가 있다.

참고문헌(References)

- [1] Kim, J.H., Kim, T.S., and Kang, H.S. (2013) Ultimate Strength Estimation of Ferritic Stainless Steel Single Shear Bolted Connections Fastened with Four Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.6, pp.659-669 (in Korean).
- [2] Kim, T.S. (2016) An Experimental Study on Block Shear Fracture of Base Metal in Ferritic Stainless Steel Welded Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.5, pp.303-312 (in Korean).
- [3] Hwang, B.-K., Lee, H.-C., and Kim, T.S. (2017) An Experimental Study on Block Shear Strength of Austenitic Stainless Steel (STS304) Fillet-Welded Connection, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.33, No.1, pp.41-48 (in Korean).
- [4] Kim, T., and Lim, J. (2013) Ultimate Strength of Single Shear Two-Bolted Connections with Austenitic Stainless Steel, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.13, No.1, pp.117-128.
- [5] Kim, T., Hwang, B., and Lim, Y. (2019) Development on Ultimate Strength Equation of Ferritic Stainless Steel (STS430) Two-Bolted Connection, *Advances in Structural Engineering*, Sage (Published Online).
- [6] An, S.-H., Kim, G.-Y., Hwang, B.-K., and Kim T.-S.

- (2018) An Investigation on the Ultimate Strength of Duplex Stainless Steel (STS329FLD) Bolted Connections with Two Bolts, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.22, No.5, pp.55-63(in Korean).
- [7] Kang, H.S., and Kim, T.S. (2019) Experimental Study on Structural Behaviors of Duplex Stainless Steel (STS329FLD) Bolted Connections with Four Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.1, pp.13-22 (in Korean).
- [8] Hwang, B., and Kim, T. (2019) Block Shear Behavior of Cold-Formed Duplex Stainless Steel (STS329FLD) Welded Connection with Base Metal Fracture, *Journal of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.35, No.4, pp.157-165 (in Korean).
- [9] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.
- [10] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.4: General Rules - Supplementary Rules for Stainless Steel* (EN 1993-1-4:2006), Belgium.
- [11] Oosterhof, S.A., and Driver, R.G. (2010) Effects of Connection Geometry on Block Shear Failure of Welded Lap Plate Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.3, pp.525-532.
- [12] Topkaya, C. (2007) Block Shear Failure of Gusset Plates with Welded Connection, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.29, No.1, pp.11-20.
- [13] Kim, T.-S., and Kang, H.-S. (2013) An Experimental Study on Ultimate Strength and Curling Behavior of Thin-Walled Carbon Steel Single Shear Two-Bolted Connections, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.30, No.3, pp.49-56 (in Korean).
- [14] Kim, T.S., Kuwamura, H., and Cho, T. (2008) Prediction of Ultimate Behaviors in Cold-Formed Steel Bolted Connection by the Introduction of Initial Geometric Imperfection in FE Modeling, *ISIJ International*, The Iron and Steel Institute of Japan, Vol.48, No.5, pp.671-680.

요 약: 스테인리스강은 탄소강에 비해 우수한 내구성, 연성 및 내식성을 가지고 있기 때문에 최근 구조부재와 산업의 다양한 분야에 스테인리스강을 구조용 재료로 사용하기 위한 요구가 증대되고 있다. 그러나, 국내의 구조설계기준(KDS 41)에서 스테인리스강은 구조용 재료로 포함되어 있지 않고, 그에 따른 구조설계기준도 규정되어 있지 않다. 이 논문에서는 듀플렉스계 스테인리스강(STS329FLD) 일면전단 볼트접합부에 관한 기존의 실험연구결과를 바탕으로 접합부의 최대내력과 면외변형의 영향을 조사하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 실험과 해석에서 연단거리가 비교적 큰 접합부에서 면외변형이 발생되었고 접합부의 내력을 저하시켰다. 초기변형에 따른 추가적인 변수해석을 수행하였고 초기변형을 반영한 해석결과는 듀플렉스계 스테인리스강 볼트접합부의 실험내력에 더 근접하였다.

핵심용어: 듀플렉스계 스테인리스강, 일면전단, 볼트접합부, 면외변형, 강도저하, 초기변형, 유한요소해석
