

린듀플렉스 스테인레스강의 철도차량 적용성 분석



서 승 일 한국철도기술연구원 수석연구원
(siseo@krri.re.kr)



김 정 국 한국철도기술연구원 책임연구원
(kim@krri.re.kr)



정 현 승 한국철도기술연구원 책임연구원
(jhs@krri.re.kr)

1 서론

최근 국내에서 판재로 양산·개발된 소재인 초연성 린듀플렉스 스테인레스강(super ductile Lean Duplex Stainless Steel, LDSS)은 기존 고강도 스테인레스강과 같은 강도를 지니고 있으나 가격은 STS304와 같은 일반 스테인레스강보다 저렴한 장점이 있어 경제성과 경량화가 요구되는 철도차량 차체에 효과적으로 사용될 수 있다. LDSS는 KS에도 STS329FLD로 등재(KS D 3698)되어 식기와 건축용 자재 등 다양하게 활용되고 있다. 고강도와 고연성, 경제성 등 다양한 장점이 있는 LDSS (STS329FLD)를 철도차량에도 적용할 필요가 있다. 이를 위해서는 강도와 가격뿐만 아니라, 접합성, 가공성 등 다양한 관점에서 검토가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 LDSS 소재의 철도차량 차체 적용을 위해 용접성과 가공성, 경량화 효과 등을 검증하였다.

2 LDSS 소재의 차체 경량화 효과

2.1 LDSS의 물성치

LDSS은 페라이트와 오스테나이트의 2상 조직으로 입도가 작고 고강도 특성을 보유한 듀플렉스 스테인레스강으로서 질소 함유량이 많고, 내식성 및 강도, 연성이 우수한 소재이며, 기존 STS304와 유사한 수준의 내식성이 있는 재질이나 강도는 뛰어나고, 가격 경쟁력이 있는 소재이다[1]. LDSS의 화학적 성분은 다음의 [표 1]과 같고 기계적 성질은 [표 2]와 같다[2].

[표 1] Chemical compounds of materials (unit %)

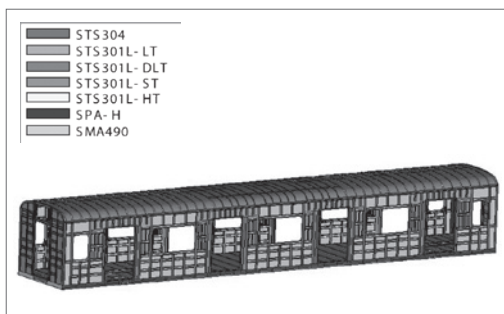
Material	C	Cr	Ni	N	Phase
STS329 FLD	<0.06	19~21	0.5~1.5	0.2~0.3	Austenite + Ferrite
STS304	≤0.08	18~20	8~10.5		Austenite
STS301L	≤0.03	16~18	6~8	≤0.2	Austenite

[표 2] Mechanical properties of materials

Material	Yield Strength (0.2%) (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
STS329FLD	488	860	45
STS304	258	651	60
STS301L-LT	215	550	45
STS301L-DLT (temper rolling 1/4H)	345	690	40
STS301L-ST (temper rolling 1/2H)	410	760	35
STS301L-MT (temper rolling 3/4H)	480	820	25
STS301L-HT (temper rolling H)	685	930	20

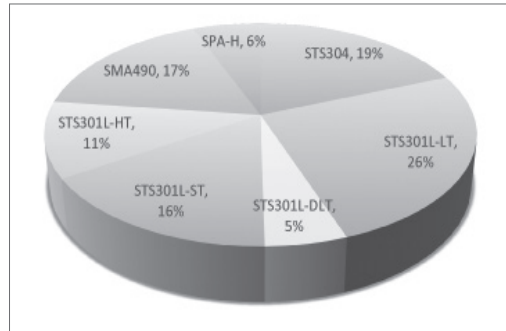
2.2 중량 감소 효과 추정

현재 운행중인 일반적인 전동차 차체에 적용된 재료의 종류는 다음 [그림 1]과 같다. 스테인레스강 STS304와 STS301L이 주로 사용되고 일부 차체 볼스터 부분에 고장력강 SMA490이 사용되는데, 차체 중량은 7,820kg 정도가 된다[3].



[그림 1] 전동차 차체 재질 분포

전동차 차체 전체 중량에서 사용하는 재료의 중량 비율을 나타내 보면 [그림 2]와 같다.

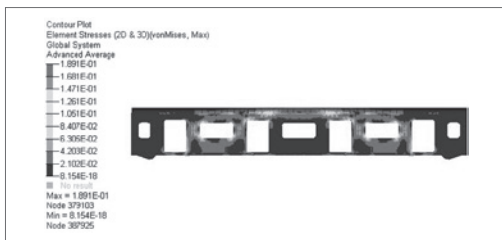


[그림 2] 차체 적용 재질별 중량 비율

LDSS 적용에 따른 차체 중량 감소 효과를 확인하기 위해 차체 설계를 변경하였다. 일부 1mm 이하의 판재는 좌굴 및 용접성, 기타 가공 문제로 두께를 감소시키기가 곤란하므로 기존 두께 그대로 두고, 두께 감소가 가능한 부분을 [표 3]과 같이 변경시켰다. 두께를 감소시킨 차체에 대해 [그림 3]과 같이 구조해석을 수행하여 강도를 검증하였다. 두께 감소에 따라 차체중량은 7,272kg으로 7% 정도 감소되었다.

[표 3] 각 부분별 두께 변경 내용

LDSS강 적용 부재		기존 두께(mm)	변경 두께(mm)
루프 프레임	루프 패널	0.8	0.8
	Carline	1.0	1.0
	Pur line	2.0	1.0
사이드 프레임	사이드 패널 프레임	1.5	1.5
	사이드 패널	2.0	2.0
	사이드 패널(도어부)	3.5	3.0
	도어 프레임	4.0	4.0
언더 프레임	크로스빔	4.0	4.0
	사이드실	4.5	4.0
	키스톤 플레이트	0.8	0.8



[그림 3] 차체 두께 변경후 수직하중 하의 응력 분포

3 점용접부 용접성 평가

3.1 LDSS 소재 시편

새로운 소재인 LDSS의 점용접성 평가를 위해 시편 시험을 실시하였다[4]. 저항점용접 전단시험 법에 관한 규격(KS B 0851)에 따라 시편을 제작하고, 규격(KS R 9204)에 명시된 바와 같이 철도 차량 차체에 적용할 수 있는 총 14가지 (0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0mm) 두께의 시편에 대해 [그림 4]와 같이 시험을 수행하였다.



[그림 4] 점용접 시편

3.2 점용접부 용접성 평가 지표

점용접부의 기계적 품질등급은 인장전단강도와 두 판재 사이에 생성된 너깃지름으로 판정된다. 최고 등급인 A급 용접부는 “특히 강도를 필요로 하는 용접부”로 정의되며 너깃 지름 이상 (t : 판재두께), 인장전단하중은 [표 4]에 제시된 강도 이상을 지닌 용접부를 의미한다(KS B 0850).

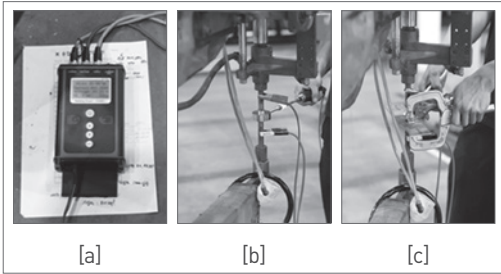
[표 4] Standards of spot weld joint

Thickness (mm)	Nugget Diameter		Tensile-shear Strength	
	Minimum (mm)	Average (mm)	Minimum (N)	Average (N)
0.4	2.7	3.2	1,646	1,960
0.5	3.0	3.5	2,352	2,744
0.6	3.3	3.9	3,057	3,606
0.7	3.6	4.2	3,920	4,626
0.8	3.8	4.5	4,782	5,645
0.9	4.0	4.7	5,723	6,664
1.0	4.3	5.0	6,664	7,840
1.2	4.7	5.5	8,781	10,270
1.4	5.0	5.9	11,054	13,014
1.5	5.2	6.1	12,230	14,426
1.6	5.4	6.3	13,485	15,837
1.8	5.7	6.7	16,150	18,973
2.0	6.0	7.1	18,816	22,109
2.3	6.4	7.6	23,206	27,283
2.5	6.7	7.9	26,342	31,046
2.6	6.9	8.1	27,910	32,928
2.8	7.1	8.4	31,203	36,691
3.0	7.4	8.7	34,653	40,768
3.2	7.6	8.9	38,102	44,845
3.6	8.1	9.5	45,472	53,469
3.8	8.3	9.7	49,392	58,016
4.0	8.5	10.0	53,312	62,720
4.5	9.0	10.6	63,661	74,794
5.0	9.5	11.2	74,480	87,651

3.3 점용접 조건

일반적으로 점용접 품질은 통전되는 전류의 크기, 통전시간, 가압력 등의 용접조건에 좌우된다. 이들 조건은 모재의 종류나 판의 두께에 따라서도 달라져야 하므로, 각각의 모재, 판두께에 맞게 적절한 용접 조건의 도출이 필요하다. 현재 철도차량 차체 제작에 적용되고 있는 점용접 환경과 용접 조건을 기준으로 약간의 변동값을 주어 적정 용접조건을 찾으려 하였다[4]. [그림 5]는 웰드 체커(weld checker)를 이용하여 가압력을 측정하면서 적정 용접조건을 찾으려 용접조건을 조절하

는 장면이다. LDSS 소재의 점용접조건은 기존 스테인레스 소재 점용접조건(STS301L기준)에 비해 대체적으로 전류값이 높게 나타나는 경향이 있다. 점용접 결과 3mm 미만은 비교적 용접이 용이하였으며, 4mm 이상의 두꺼운 판재(4.0, 4.5, 5.0)에서는 강도 향상을 위해 2차전류를 사용하여 용접을 수행하였다. [표 5]는 기존 용접 조건을 기초로 하여 얻은 LDSS 시편의 적정 용접조건이다. 용접조건의 적정성은 인장강도시험과 너깃지름 측정을 통해 검증한다.



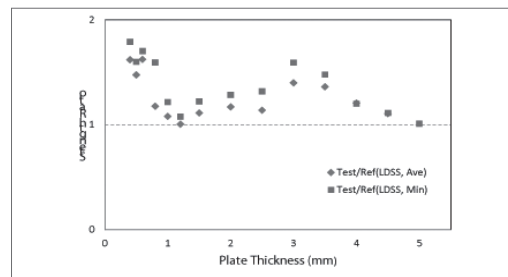
[그림 5] 적정 용접조건 도출을 위한 계측

[표 5] Spot welding conditions and quality standards

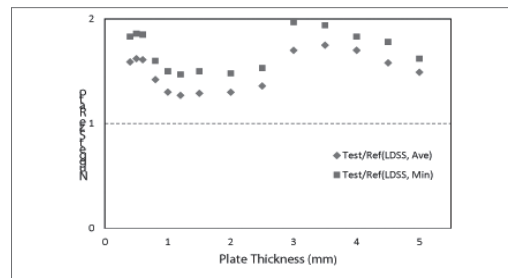
LDSS Thickness (mm)	Welding Condition		
	Current(A) 1st/2nd	Applied Force (N)	Time(Cycles) 1st/2nd
0.4	6,000/-	6,860	50/-
0.5	6,000/-	6,860	50/-
0.6	6,000/-	6,860	50/-
0.8	6,000/-	6,860	50/-
1.0	6,000/-	6,860	50/-
1.2	6,200/-	7,350	50/-
1.5	6,200/-	7,350	50/-
2.0	6,900/-	7,350	50/-
2.5	7,500/-	7,840	50/-
3.0	8,500/12,000	10,780	50/80
3.5	9,000/12,500	10,780	55/90
4.0	9,500/13,000	10,780	55/90
4.5	10,500/14,300	10,780	70/95
5.0	10,800/15,500	10,780	75/95

3.4 점용접부 인장전단 하중 시험 결과

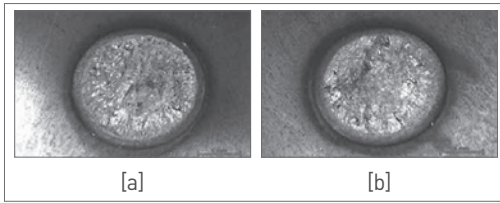
규격(KS B 0851)에서 명시된 시험 절차에 따라 공인시험기관에서 점용접 시편의 인장전단 시험을 실시하였으며, 최대 인장전단 하중과 너깃지름을 측정하였다. 측정된 값은 품질기준을 판별하기 위하여 각 조건별로 최소값과 평균값으로 산출하였다. 인장전단하중 시험 결과를 [그림 6] 및 [그림 7]에 요약하였으며, 너깃부 지름 측정을 위한 파단부 사진(3mm 11개의 시편 중 시편 1과 시편 2)를 [그림 8]에 제시하였다. 규격(KS 0850)에서 규정하고 있는 품질 기준값에 대한 LDSS 소재의 인장전단강도, 너깃지름에 대한 비를 판 두께별로 그래프로 도시한 것이다. 이 비가 1보다 높으면 기준보다 높은 품질이 얻어졌음을 의미하며, 높은 값을 가질수록 더욱 양호한 품질이 얻어졌음을 나타낸다. 각 조건에서 기준값을 상회하며, 특히 판재의 두께가 낮을수록 더 양호한 품질을 나타내었다.



[그림 6] Test results of tensile shear strength



[그림 7] Test results of nugget diameter

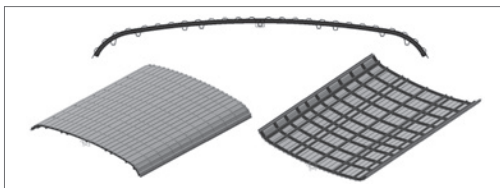


[그림 8] Pictures of fractured surfaces for the measurement of nugget diameter

4 LDSS소재 적용 차체 블록 제작

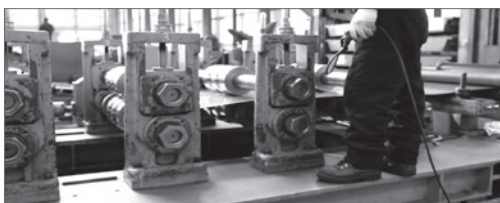
4.1 루프 블록 부품 성형

LDSS 소재로 전동차 차체의 일부분인 루프 (roof) 블록을 제작하기 위해 소재의 가공성을 검토하였다[5]. 루프 블록은 Fig. 9과 같이 크게 루프패널(roof panel), 카라인(car line), 퍼라인(pur line), 캔트레일(cantrail) 등으로 이루어져 있다.



[그림 9] 루프 블록의 구성

루프 블록 부품의 제작을 위해 판재의 굽힘, 롤포밍(roll forming), 스트레치포밍(stretch forming) 등의 가공 기법이 사용된다. 코일강판을 [그림 10]과 같이 롤포밍하여 주름판 형상으로 가공하였다.



[그림 10] 롤포밍에 의한 루프 패널 가공

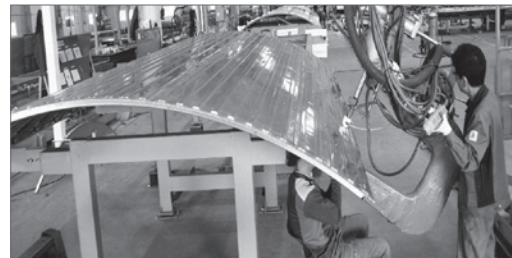
카라인은 강판을 롤포밍하여 1차 성형한 후 [그림 11]과 같이 스트레치포밍으로 곡선부를 2차 성형한다. 퍼라인과 캔트레일은 롤포밍 혹은 굽힘 가공으로 제작하였다.



[그림 11] 스트레치포밍에 의해 제작된 카라인

4.2 루프 블록 제작

폭 방향으로 여러 장의 주름판을 시임용점으로 접합하여 루프 패널을 제작하고, 폭방향으로 카라인을 점용점으로 접합한 후, 길이 방향으로 퍼라인을 접합하여 루프 블록을 완성하였다. [그림 12]는 루프 패널에 카라인을 점용접하는 장면이고 [그림 13]은 완성된 루프 블록의 내부를 보여준다.



[그림 12] 루프 패널과 카라인 점용접



[그림 13] 완성된 루프 블록 내부

소재의 기계적 특성에 따라 롤포밍 성형과정에서 뒤틀림, 국부적인 좌굴, 스프링백(Spring back), 표면 균열 등의 현상이 발생하기도 하나, LDSS 소재의 경우에는 이러한 문제점이 발생하지 않았고 설계된 형상대로 제작이 완성되었다. 또한 완성된 루프블록의 외판은 용접부 표면 얼룩, 압흔 등 결함이 없음을 확인하였다.

5 결론

본 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 신개발 강종인 LDSS 판재를 철도차량 차체에 적용하는 경우 약7%의 차체중량 감소를 얻을 수 있었다.

- 2) LDSS 판재의 점용접을 수행하기 위한 조건을 제안하였으며, 규격에 따른 시편에 대해 제안된 조건에 따라 점용접을 실시하고 인장전단 강도와 너깃 크기를 계측하여 용접성을 평가한 결과, 규격의 요구조건을 만족시킴을 확인하였다.

- 3) LDSS 판재에 대해 롤포밍, 스트레칭포밍, 굽힘 등의 가공을 한 경우, 성형성과 가공성이 우수하여, 가공 과정에서 뒤틀림, 국부적인 좌굴, 스프링백, 표면 균열 등의 문제가 발생하지 않았다.

- 4) LDSS 판재를 이용하여 루프 블록을 제작한 결과, 품질이 양호하여 철도차량 차체에 확대 적용할 수 있음을 확인하였다.



참고문헌

1. 최점용(2014), "PosSD STS강의 개발 및 이용", 대한금속재료학회 제76회 철강기술심포지움.
2. 서승일, 김정국, 정현승(2016), "인터모달 트램 차체 경량화를 위한 신개발 스테인레스 강재 적용성 연구," 한국산학기술학회논문집, 제 17권, 제 3호, pp.457-463.
3. 서승일(2014), "Lean Duplex STS의 철도차량 차체 적용성 분석", 대한금속재료학회 제76회 철강기술심포지움.
4. 임재용 외(2014), "철도차량 적용을 위한 신개발강종 LDSS 3종의 점용접성 평가," 한국철도학회 2014년 춘계학술대회논문집, pp.318-323.
5. 정현승 외(2014), "LDSS 소재를 적용한 철도차량 루프 블록 제작," 한국철도학회 2014년 춘계학술대회논문집, pp. 211-216.