Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 3 pp. 457-463, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.3.457
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

인터모달 트램 차체 경량화를 위한 신개발 스테인레스 강재 적용성 연구

서승일[1*], 김정국[1], 정현승[2]
[1]한국철도기술연구원 신교통연구본부, [2]한국철도기술연구원 철도안전연구실

A study on the applicability of newly developed stainless steel for weight reduction of carbody of intermodal tram

Sung-il Seo[1*], Jeong-guk Kim[1], Hyun-seung Jung[2]
[1]**New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute**
[2]**Railway Safety Research Division, Korea Railroad Research Institute**

요 약 신규 개발된 초연성 듀플렉스 스테인레스강은 강도와 연성이 우수하기 때문에 철도차량 차체에 적용하여 경량화와 가공 효율화에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 듀플렉스 스테인레스강의 장점을 인터모달 트램 차체에 활용하기 위해 점용접성 시험을 수행하였다. 다양한 두께 (0.4mm에서 5.0mm까지)의 시편을 가공하고 점용접 시험을 통해 적정 용접조건을 찾아내었다. 인장하중 시험을 통해 점용접 이음의 인장-전단 강도를 평가하였고, 품질을 확인하기 위해 너깃 지름을 측정하였다. 인장-전단 하중 시험 결과의 분석을 통해, 이음부의 인장-전단 강도는 입열 파라미터에 비례함을 알 수 있었다. 인장-전단 강도와 너깃 지름는 모두 규격에서 요구하는 기준을 만족함도 입증되었다. 전체적인 용접성 시험 결과, 듀플렉스 스테인레스강 소재는 인터모달 트램 차체에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

Abstract The newly developed super ductile duplex stainless steel (SDSS) has good strength and ductility, and it can be used to reduce weight and improve the fabrication efficiency of a carbody of a rolling stock. In this study, spot weldability tests were conducted to take advantage of SDDSS in a carbody for an intermodal tram. Specimens of various thickness (0.4 to 5.0 mm) were prepared to find the proper welding conditions, and tensile load tests were conducted to evaluate the tensile-shear strength of spot welded joints. Then, nugget diameters were measured to verify the quality. The tensile-shear strength was found to be proportional to the heat parameter. It was verified that the tensile-shear strengths and nugget sizes of the joints satisfy the standard requirements. The overall weldability tests confirmed that SDDSS can be used effectively for the carbody of an intermodal tram.

Keywords : Carbody, Nugget Diameter, Spot Welding, Super Ductile Duplex Stainless Steel, Tensile-shear strength, Tram, Weight reduction

1. 서론

인터모달 트램은 도로상에서 주행하는 철도차량으로서 경전철 규모의 시스템이다. 트램은 과거 노면전차로서 운행된 사례가 있으나, 자동차의 대중화와 함께 도로에서 자취를 감추었다. 그러나, 화석에너지 고갈과 대기오염의 문제가 심각해지면서 친환경 교통수단인 철도의 장점이 부각되어 도로에서 트램이 부활하고 있다[1]. 특히 Fig. 1과 같이 산악지역 도로에서 자동차와 함께 주행하는 산악 인터모달 트램은 접촉사고가 자주 발생하여 차체의 부분 손상이 우려된다. 트램은 경전철의 일종이므로 경량화를 위해 알루미늄 합금 압출재를 차체에 적

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업 연구과제로 수행되었음
*Corresponding Author : Sung-il Seo (KRRI)
Tel: +82-31-460-5623 email: siseo@krri.re.kr
Received December 7, 2015 Revised (1st January 26, 2016, 2nd March 2, 2016)
Accepted March 3, 2016 Published March 31, 2016

용하고 있으나, 내피와 외피 및 심재(core)까지 있는 중공 압출재의 경우 손상이 발생하였을 때, 부분적인 교체가 어려운 단점이 있다. 따라서, 트램 차체의 경우 유지보수 측면에서 스틸을 사용하는 경우가 많다. 그런데, 스틸 판재는 중량대비 강도가 낮기 때문에 차체의 무게가 증가하는 단점이 있어 에너지 효율성이 떨어지는 문제가 있다. 이런 문제점은 STS301L과 같은 철도차량용 고강도 스테인레스강재를 사용하는 것으로 해결할 수 있으나 재료비가 상승하는 또다른 문제를 유발한다. 국내에서 최근 개발된 소재인 초연성 듀플렉스 스테인레스강(Super Ductile Duplex Stainless Steel, SDDSS)은 기존 고강도 스테인레스강재와 같은 강도를 지니고 있으나 가격은 STS304와 같은 일반 스테인레스 강재보다 저렴한 장점이 있어 트램과 같은 경량화 및 유지보수성이 요구되는 차체에 효과적으로 사용될 수 있다[2]. 새로운 소재를 차체에 적용하기 위해서는 강도와 가격 뿐만 아니라, 접합성, 가공성, 유지보수성 등 다양한 관점에서 검토가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 SDDSS 소재의 트램 차체 적용성을 검토하기 위해, SDDSS 소재로 점용접(spot welding) 시편을 제작하고 두께별로 적정 용접조건을 설정하여 점용접을 실시한 후에 인장-전단 강도 시험을 수행하였으며, 파면 너깃 지름을 측정하였다. 이러한 점용접부 시험결과를 바탕으로 기존 스테인레스강 소재의 대체 가능 여부를 판단하였다.

Fig. 1. Mountain intermodal tram on road

2. 트램용 스테인레스강 재료

2.1 SDDSS 물성치

SDDSS은 페라이트와 오스테나이트의 2상 조직으로, 입도가 작고 고강도 특성을 보유한 듀플렉스 스테인레스강이며, 질소 함유량이 많고, 강도 및 연성이 우수한 소재이며, 기존 STS304와 유사한 수준의 내식성이 있는 재질이나 강도는 뛰어나고, 가격 경쟁력이 있는 소재이다[3]. SDDSS의 화학적 성분은 다음의 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1. Chemical compounds of materials(unit %)

Material	C	Cr	Ni	N	Phase
SDDSS	<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

Table 2. Mechanical properties of materials

Material	Yield Strength (0.2%) (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SDDSS	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 철도차량 차체 재료 구성

철도차량 차체에는 다양한 스테인레스강 소재가 적용되고 있다. 기존 실적 자료에 따르면, 전동차 차체의 재료 구성 비율은 다음의 Fig. 2와 같다[4]. 재료 구성을 보면 스테인레스강 소재로 STS304와 STS301L-LT, STS301L-DLT, STS301L-ST, STS301L-HT 등이 사용된다. 각 재료의 강도 특성은 Table 2에 함께 나타냈는데, 강도가 상대적으로 작은 STS304와 STS301L-LT가 각각 19 %와 29%를 차지하고 있다. 따라서, 이들 재료를 SDDSS로 변경한다면, 효과적으로 중량을 감소시킬 수 있다.

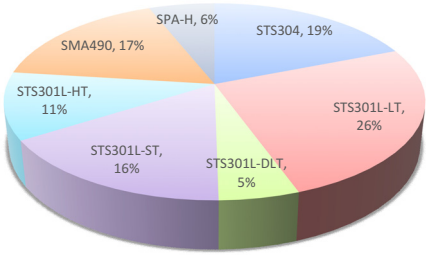


Fig. 2. Materials of car body of electric multiple unit

3. 점용접부 용접성 시험평가 방법

3.1 SDDSS 소재 시편

새로운 소재인 SDDSS의 점용접성 평가를 위한 시험편의 치수 및 수량은 저항점용접 전단시험법에 관한 규격(KS B 0851)을 따르도록 하였다[5]. 규격에 따르면 시험편의 치수는 판두께에 따라 달라지는데, 세부 시험편 치수는 아래의 Table 3과 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 점용접부 인장-전단 강도평가를 위한 유효데이터는 각 조건, 즉 모재 및 판 두께 별, 최소 11개를 요구하게 된다.

시편의 두께는 규격(KS R 9204)에 명시된 바와 같이 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)이며[6], 이는 앞에서 언급하였듯 스테인레스 철도차량 차체를 이루고 있는 부재 대부분을 포함할 수 있다.

Table 3. Specimen dimension for tensile- shear tests

Plate thickness	W	L	A	B
0.3-0.8	20	20	75	70
0.8-1.3	30	30	100	90
1.3-2.5	40	40	125	100
2.5-5.0	50	50	150	110

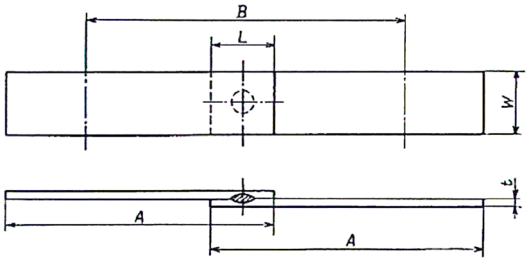


Fig. 3. Specimen shape

3.2 점용접부 용접성 평가 지표

새로운 소재인 SDDSS의 점용접성 평가를 위한점용접부의 품질등급은 기계적 성질과 평활도로 구분되며, 특히, 기계적 성질에 관한 품질등급은 크게 인장-전단 강도와 두 판재 사이에 생성된 너깃지름으로 판정된다. A급 등급의 용접부란 “특히 강도를 필요로 하는 용접부”로 정의되며 너깃 지름 $5\sqrt{h}$ 이상 (h;판재두께), 인장-전단 하중은 Table 4에 제시된 강도 이상을 지닌 용접부를 의미한다[7].

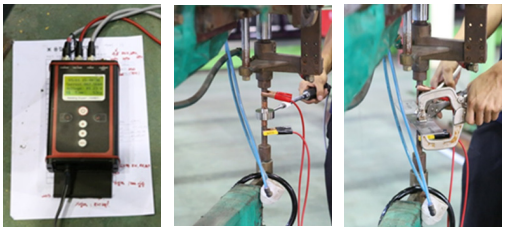
Table 4. Standards of spot weld joint

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 또한 모재의 종류나 판두께에 따라서도 달라져야 하므로, 각각의 모재, 판두께에 맞게 적절한 용접 조건의 도출이 필요하다. 최적의 용접조건을 찾기 위해서는 체계적인 실험계획법을 통한 탐색이 필요하나, 기존에 적용되는 적정 용접조건으로부터 새로운 적정 용접조건을 찾는 것이 시행착오를 줄이는 효율적인 방법이 될 수 있다.

본 연구에서는 현재 철도차량 차체 제작에 적용되고 있는 점용접 환경과 용접 조건을 기준으로 약간의 변동값을 주어 적정 용접조건을 찾도록 하였다[8]. Fig. 4는 웰드 체커(weld checker)를 이용하여 가압력을 측정하면서 적정 용접조건을 찾도록 용접조건을 조절하는 장면이고, Fig. 5는 용접후 시편의 모습이다. SDDSS 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. Table 5는 기존 용접 조건을 기초로 하여 얻은 SDDSS 시편의 적정 용접조건이며, 규격에 따른 인장-전단 강도와 너깃지름에 대한 기준은 Table 4에 제시하였다. 용접조건의 적정성은 인장강도 시험과 너깃지름 계측을 통해 검증한다.



(a) (b) (c)

Fig. 4. Pre-test for welding conditions (a) Calibration of the spot weld machine (b) Measuring applied force (c) Spot welding of SDDSS specimens

Fig. 5. Spot welded specimens

Table 5. Spot welding conditions for SDDSS specimens

SDDSS Thickness (mm)	Welding Condition		
	Current(A) $1^{st}/2^{nd}$	Applied Force(N)	Time(Cycles) $1^{st}/2^{nd}$
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 인장-전단 강도의 분석

시편에 대해 Table 5에 주어진 조건에 따라 점용접을 실시한 후, 인전전단 강도시험을 실시하였다. Table 6는 점용접 시편의 인장-전단 시험 결과를 정리한 것이다. 인장-전단 강도는 시편의 두께와 용접조건에 따라 차이를 보이고 있는데, 시편 두께가 커질수록 강도가 크게 나타나는 경향이 있다. 인장-전단 강도는 전류가 가해지는 통전부 접촉면에서 충분한 용융이 생겨서 접합이 이루어질 때 기준치 이상의 값을 보여준다. 따라서, 가해지는 열량이 강도와 직접적인 관계가 있는 것으로 추정된다. 이를 확인하기 위해 점용접시 모재에 가해지는 열량을 다음 식으로 표현한다.

$$Q = I^2 Rt \tag{1}$$

여기서, Q = 발열량(J)
I = 전류(A)
R = 용접부 저항(Ω)
t = 통전시간(sec)

물체의 저항은 길이에 비례하므로($R \propto h$) 식(1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = c_r A_t I^2 ht = c_r A_t P_Q \tag{2}$$

여기서, c_r = 물체의 비저항

h = 판두께(m)

A_t = 용접팁과 접촉면적(m)

$P_Q = I^2ht$ = 입열량 파라미터

식(2)에서 표시된 열량 파라미터로 판두께에 따른 인장-전단 강도 시험 결과를 나타내보면 Table 6과 같다. Table 6을 그림으로 표시해보면 Fig. 6과 같은데, 약간의 편차는 있으나, 전체적으로 인장-전단 강도는 입열량 파라미터와 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다.

Table 6. Pre-test of tensile shear strength of spot weld joints

SDDS Thick-ness (mm)	Measured Value		Heat input Parameter $P_q = I^2ht$
	Nugget Diameter (mm)	Tensile Shear Strength (N)	
0.4	4	7,115	12,000
0.5	4	6,674	15,000
0.6	4	6,311	18,000
0.8	5.5	8,673	24,000
1.0	6.5	9,908	30,000
1.2	7	12,554	38,440
1.5	7	15,856	48,050
2.0	8	22,040	79,350
2.5	8	33,153	117,188
3.0	9.5	51,881	180,625
3.5	10	75,254	259,875
4.0	10.5	69,609	330,917
4.5	11	91,503	578,813

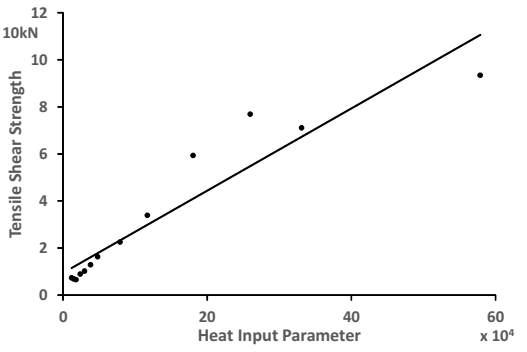


Fig. 6. Tensile shear strength of spot weld joints arranged with heat input parameters

4. 점용접성 시험결과

4.1 점용접 시험

예비 점용접 시험을 통해 결정된 적정용접 조건을 이용하여 두께(총14가지)별 11개의 인장-전단 시험편을 제작하였다. 규격(KS B 0851)에서 명시된 시험 절차에 따라 공인시험기관에서 점용접 시편의 인장-전단 시험을 실시하였으며, 최대 인장-전단 하중과 너깃지름을 측정하였다. 측정된 값은 품질기준을 판별하기 위하여 각 조건별로 최소값과 평균값을 산출하였다.

4.2 점용접부 인장–전단 하중 시험 결과

SDDSS 점용접부 전단-하중 시험 결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에 요약하였으며, 너깃부 지름 측정을 위한 파단부 사진(3mm 11개의 시편 중 시편 1과 시편 2)을 Fig. 9에 제시하였다. 규격(KS 0850)에서 규정하고 있는 품질 기준값에 대한 SDDSS 소재의 인장-전단강도, 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.

Fig. 7로 표현된 SDDSS 점용접부 강도의 우수성을 확인하기 위해, 기존에 사용하고 있던 스테인레스강 STS304의 인장-전단 강도 시험 결과를 인용하면 다음의 Table 7과 같다[9]. STS304 판재 2mm와 3mm를 점용접한 시편의 평균 인장-전단강도는 18,801(N)인데 비하여 SDDSS 2mm 점용접시편의 평균 인장-전단강도는 25,889(N)으로서 SDDSS 점용접부의 강도가 1.4배 더 높음을 알 수 있다.

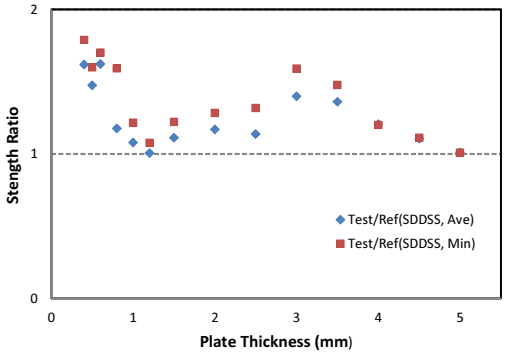


Fig. 7. Test results of tensile shear strength

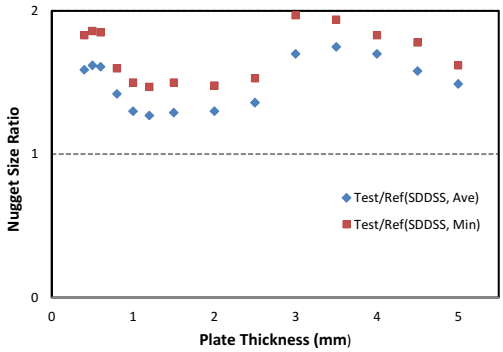
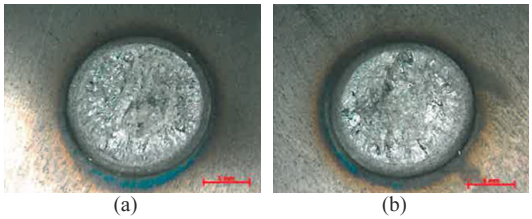


Fig. 8. Test results of nugget diameter



(a) (b)

Fig. 9. Pictures of fractured surfaces for measurement of nugget diameter (a) Specimen 1 (b) Specimen 2

Table 7. Tensile shear strength of previous material STS304

STS304 Thickness (mm)	Welding Condition			Tensile- shear Strength(N)
	Current(A) 1st	Applied Force(N)	Time (Cycles)1st	
2mm+3mm	9,000	6,860	34	20,707
2mm+3mm	9,000	6,860	15	12,691
2mm+3mm	9,000	6,860	8	17,542
2mm+3mm	9,000	6,860	10	24,264
Average				**18,801**

5. 결 론

본 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 신개발 강종인 SDDSS 판재의 두께별 적정 점용접 조건을 제안하였다.
2) 규격에 따른 시편에 대해 제안된 조건에 따라 점용접을 실시하고 인장-전단 강도와 너깃 크기를 계측하여 용접성을 평가한 결과, 규격의 요구조건을 만족시킴을 확인하였다.
3) 용접성 평가 결과를 분석한 결과, 인장-전단 강도는 점용접시의 입열량에 직접 관계가 있으며, 본 연구에서 제시한 입열량 파라미터와 선형적인 관계가 있음을 확인하였다.
4) SDDSS 판재는 트램 차체에 적용할 수 있을 만큼 양호한 점용접성을 갖고 있으며, 기존 재질 의 점용접 시편에 비해서도 우수한 인장-전단강도특성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 본 연구 수행을 위해 도움을 주신 포스코 기술연구소 최점용 박사, 원성연 박사께 감사드립니다.

References

[1] S. I. Seo, H. S. Mun, M. Sagong, “Problems and Solutions for Introduction and Operation of Mountain Railway”, Railway Journal, Vol. 17, No. 4, pp. 30-33, 2014

[2] J. Y. Lim, H. S. Jung, J. G. Kim, S. I. Seo, S. Y. Won, J. Y. Choi, “Spot-Welding Evaluations of Three LDSSs for Future Railway Applications”, Proc. of 2014 Spring Conference of the Korean Society for railway, May, 2014

[3] J. Y. Choi, “Development of Lean Duplex STS”, 76th Steel Symposium, The Korean Institute of Metals and Materials, 2014

[4] S. I. Seo, “Study on the Design Technology of Stainless Steel Carbody of Rolling stock”, Jour. of the Korean Society for Railway, Vol. 7, No. 2, pp. 39-47, 2004

[5] KS B 0851, Specimen Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot and Embossed Projection Welded Joints, Korean Standards Association, 2006

[6] KS R 9204, Welded Joints of Stainless Steel for Railway Rolling Stock-Design Method, Korean Standards Association, 2006

[7] KS B 0850, Method of Inspection for Spot Weld, Korean Standards Association, 1991

[8] S. I. Seo, “Study on the Manufacturing Process of Stainless Steel Carbody of Rolling Stock”, Jour. of the Korean Society for Railway, Vol. 7, No. 3, pp. 34-42, 2004

[9] S. I. Seo, S. G. Jang, “A study on the Development of Insulated Electrode Tip for Spot Welding to Reduce Indentation”, Jour. of Korean Welding Society, Vol. 21, No. 1, pp. 42-47, 2003

서 승 일(Sung-il Seo) **[정회원]**

- 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 조선공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 1986년 2월 ~ 2002년 3월 : 한진중공업기술연구소 수석연구원
- 2002년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>
용접구조, 철도차량시스템

김 정 국(Jeongguk Kim) **[정회원]**

- 1987년 2월 : 부산대학교 무기재료공학과 (공학사)
- 2002년 5월 : The University of Tennessee, Knoxville, 재료공학과 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>
철도차량시스템, 비파괴평가 및 수명예측

정 현 승(Hyun-Seung Jung) **[정회원]**

- 1997년 2월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원
- 2006년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 로보틱스 및 가상공학과 교수

<관심분야>
철도차량 경량화, 충돌안전