Journal of the KIMST, Vol. 19, No. 5, pp. 567-573, 2016
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2016.19.5.567

Technical Paper | 구조 · 기기 부문

차륜형장갑차 고경도장갑강에 대한 스터드 용접의 적용

조환휘[1] · 신용철[2] · 이희준[*,2]

[1] 국방기술품질원 기동화력 1팀
[2] 현대로템㈜ 중기사업본부

STUD Welding on High Hardness Armor Steel of KWV

Hwan-Hwi Cho[1] · Yong-cheol Shin[2] · Hui-jun Yi[*,2]

[1] *The 1st Land System Team, Defense Agency for Technology and Quality, Korea*
[2] *Defense Inducstrial Division, Hyundai Rotem Company, Korea*

(Received 3 March 2016 / Revised 15 July 2016 / Accepted 23 September 2016)

ABSTRACT

GMAW and GTAW processes have been used for welding of equipment mounting pads during decades. For improving the mobility and survivability of KWV(Korean Wheeled Vehicle), various types of equipment are required and numbers of pads for welding were increased. In this research, for improving productivity of mounting pads welding process, new technology of stud welding was studied. In this study, mechanical properties of stud weldment were investigated to compare with those of GMAW weldment. Also, research of stud weldment durability was carried out and proved its fatigue strength under the condition of KWV's 32,000 km load profile.

Key Words : KWV(차륜형장갑차), STUD Welding(스터드 용접), High Hardness Steel(고경도장갑강)

1. 서 론

차륜형 장갑차는 보병부대의 신속한 집중과 분산, 생존성과 타격력 향상을 목적으로 개발되었다. 이를 위해 차륜형장갑차의 동체구조물은 기동성과 생존성을 동시에 만족시키고자 MIL-A-46100 등급의 고경도장갑강(High Harness Amor Steel)을 이용하였다. MIl-A-46100 등급의 고경도장갑강은 피탄성능 향상을 위해 높은 경도(Rokwell 경도기준 : 50~55HRC)를 요구하는 Q&T (Quenching & Tempering) 강이다. 고경도장갑강은 높은 경도로 인해 높은 수준의 방탄성능을 가지고 있으나, 가공성 등의 제작성이 낮아 경제적인 측면에서 절단공법과 용접공법 등 열원을 이용한 방법 만을 한정적으로 제작에 이용하고 있다. 고경도장갑강에 이용되는 용접공법은 용융점 이상의 온도에서 접합이 이루어지는 용융용접(Fusion welding)만을 사용하고 있으며, 일반적으로 산업현장에 널리 사용되는 GMAW(Gas Metal Arc Welding)과 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)이 가장 많이 사용되고 있다.

* Corresponding author, E-mail: jun@hyundai-rotem.co.kr

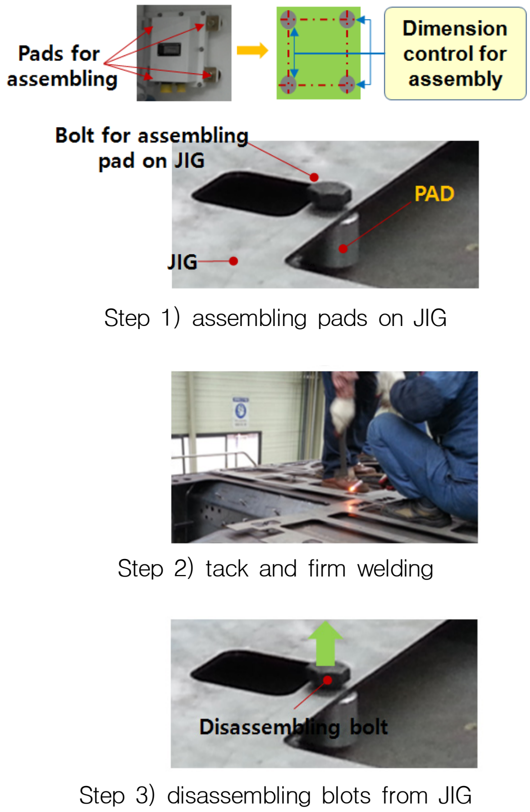


Fig. 1. Process sequence of GMAW welding

차륜형 장갑차에 적용되는 유압장치, 제어장치와 통신장치 등 다양한 형태의 부품을 조립하기 위해, 체결용 패드를 GMAW 혹은 GTAW 등의 용융용접을 이용하여 고경도장갑강에 접합하고 있다. 용융용접을 이용하는 경우, 체결되는 부품의 형상과 체결류에 따라 요구되어지는 형상 혹은 치수공차를 만족시키기 위해 치공구를 이용하여 Fig. 1과 같이 공정을 진행하게 된다. 먼저, 치공구에 체결용 패드를 체결하고 용접하고자 하는 위치에 정확히 위치시킨 뒤에 가용접 후 본용접하는 순서로 공정을 진행하게 된다. 이 경우 부품과의 체결성을 확보할 수 있다는 장점이 있으나, 치공구에 패드를 체결하고 용접 후 다시 분리를 하는 불필요한 작업이 발생 되고 경우에 따라 2인 1조로 작업을 해야 함에 따라 생산성이 저하되는 문제가 있다. 특히, 사용군이 요구하는 높은 수준의 성능조건을 만족시키기 위해 다양한 장비가 탑재되는 요즘의 경우 불필요한 공정으로 인해 발생되는 손실이 증가되고 있다. 이런 문제점을 해소하고자 본 연구에서는 체결용 패드를 용접하는 GMAW 혹은 GTAW 방식이외의 스터드 용접(STUD welding)을 적용하는 방법에 대해 연구하였다.

스터드 용접은 Fig. 2와 같이 전도체가 접촉 후 떨어질 때 고전류의 아크(Arc)가 형성되는 물리적 현상을 이용하여 볼트류와 패드류를 접합하는 용접방법으로 1940년대 조선소의 용접공이던 테드 넬슨(Ted Nelson)에 의해 개발되어 현재까지 조선, 건설, 백색가전, 자동차 등의 다양한 분야에 이용되고 있다[1-5]. 기존의 용접방식이 패드 부착을 위해 아크 열원을 이용하여 용가재(Filler metal)를 용융시켜 접합을 했던 반면, 스터드 용접의 경우 패드 자체가 용가재가 되고 열원을 발생시키는 방식이다[6-8]. 이런 특징으로 인해 스터드 용접은 기존 공정의 문제점인 패드를 치공구에 조립을 하고 용접 후 다시 해체를 하는 문제점을 해소할 수 있는 효과적인 방법이다. 이번 연구에서는 차륜형장갑차에 사용되는 고경도장갑강에 스터드 용접을 적용하기 위해 GMAW 용접법으로 용접된 용접부와 스터드 용접부에 대해 기계적 성질, 경도분포와 미세조직을 비교하였다. 또한, 실제 차량이 주행 시 외부에서 들어오는 하중에 대한 용접부의 내구성 평가를 위해 차체 구조 중 엔진이 장착되는 엔진실 부분에 대한 모의 구조물을 제작하고 여기에 스터드 용접방법을 이용하여 패드를 용접한 후 실제 부품보다 4배 중량의 더미 부품을 이용하여 내구시험을 수행하였다.

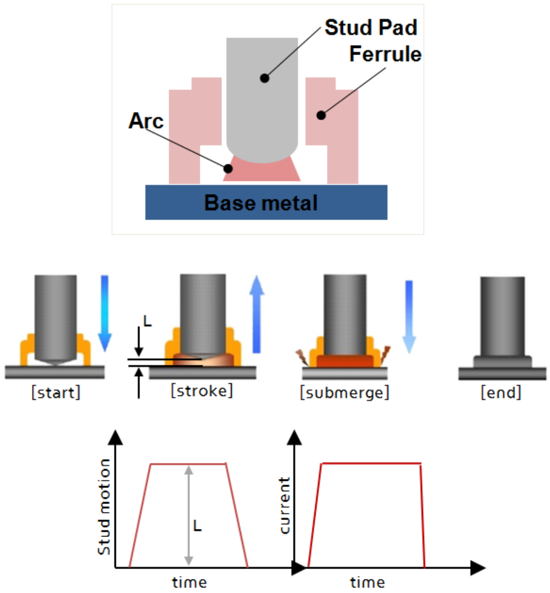


Fig. 2. STUD welding process

2. 용접부 비교 평가

2.1 용접시험

스터드 용접부의 기계적 성질과 고경도장갑강과의 용접성 확인을 위해 기존 GMAW 용접부와의 비교 시험을 수행하였다. 차륜형 장갑차 동체구조에 사용되는 고경도장갑강의 화학적 성분과 기계적 성질을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 각각의 용접법을 이용하여 시험편을 제작하였으며 시험편 제작에 사용된 용접조건을 Table 3에 나타내었다. GMAW의 경우 ESAB사의 Spoolarc95(AWS A5.28, MIL-100S 등급)를 용가제로 이용하였다. 스터드 용접의 경우 Nelson사에서 제작된 Drawn arc 방식의 스터드 용접용 패드와 페룰(Ferrule)을 이용하였다. 두 용접방식 모두 스터드 용접용 패드를 이용하여 스터드 용접과 GMAW 용접에 사용하였다.

Table 1. Chemical composite of high hardness armor steel(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.32	0.4	1.2	0.015	0.01	1.0	1.8	0.7

Table 2. Mechanical properties of high hardness armor steel

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HBW)
1,250	1,450	5	480-540

2.2 용접부 비교 시험결과

2.2.1 전단강도와 인장강도 평가

TACOM Drawing 12479550[9]에 의거하여 전단강도와 인장강도를 평가하였다. 5개 시험편에 대해 실시하여 최대·최소값을 제외한 나머지 값을 평균하였다. 전단강도 시험결과, 두 시험편 모두 규격에서 요구하는 기준값을 만족하였으며, 동일한 전단강도에서 나사부가 파단되었다. 인장강도의 경우, 스터드 용접부가 GMAW 용접부에 비해 약 7 % 정도 높은 값을 나타내었으며, 모두 용접부에서 파괴가 발생되었다. 시험결과를 Table 4와 같이 정리하였으며, 전단시험과 인장시험 후 용접부 파단부를 Fig. 3에 같이 나타내었다.

Table 3. Welding parameters of GMAW and STUD welding

Identification	Ampere (A)	Voltage (V)	Welding time (s)
GMAW	280 ~ 290	25.4	8.0
STUD welding	1500	-	0.9

Table 4. Test results of torque and tension strength

Identification	GMAW	STUD welding	Remark
Torque test	satisfied	satisfied	Fracture on bolt
Tension test	Avg.420MPa	Avg.450MPa	Fracture on weldment

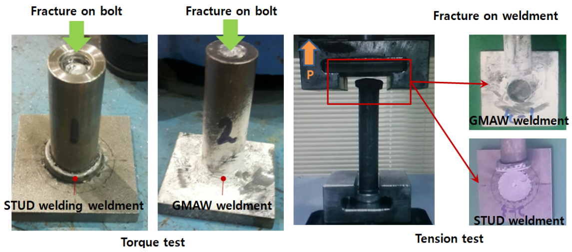


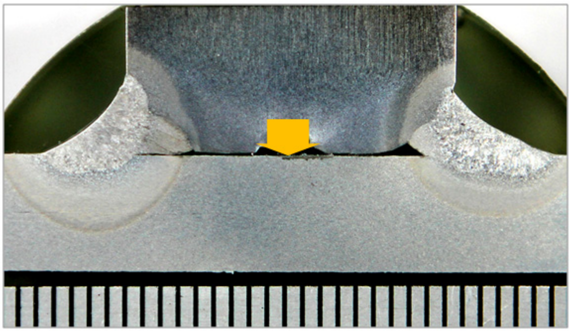
Fig. 3. Illustration of fracture place on test specimens

2.2.2 마크로 시험, 경도분포와 미세조직 비교

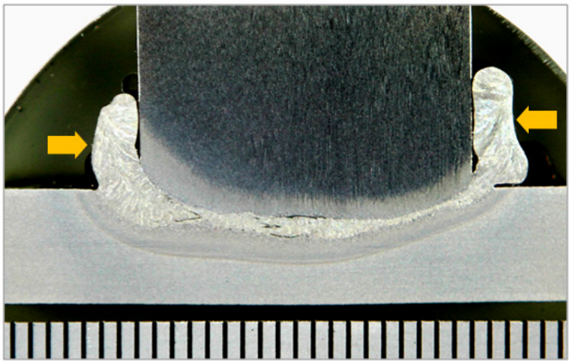
두 용접부에 대해 마크로 시험결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 (a)에서 확인할 수 있듯이 GMAW 용접부의 경우 미용융구간이 발생하고 있다. 이는 해당 공법이 가지고 있는 특징으로 Fig. 4의 스터드 용접부에서는 발견되지 않는다. 이는 스터드 용접이 스터드 패드 자체를 용가재로 사용하기 때문이며 마크로 시험에서 확인할 수 있듯이 용융상태에서의 가압으로 인해 버(Burr)가 용접부 주변에 형성되어 있음을 확인 할 수 있다.

각 용접방법에 따른 용접부 경도분포를 확인하였다. 경도시험은 비커스 경도계를 이용하였다. 경도 시험에 대한 상대적 비교가 어려움에 따라, 열영향부에 대해서만 경도를 확인하고자 10개소에 대해 무작위로 경도를 측정하였다. 시험 결과, GMAW의 경우 최소 394.0

Hv에서 최대 454.8 Hv를 나타내었으며, 스터드 용접의 경우 최소 474.2 Hv에서 492.6 Hv를 나타내었다. 이를 통해 스터드 용접부가 상대적으로 낮은 용접입열의 영향을 받은 것을 알 수 있다.



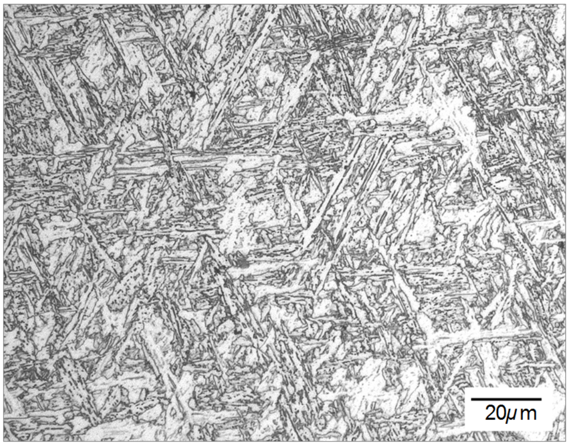
(a) Macro test result of GMAW ; arrow indicates incomplete fusion line



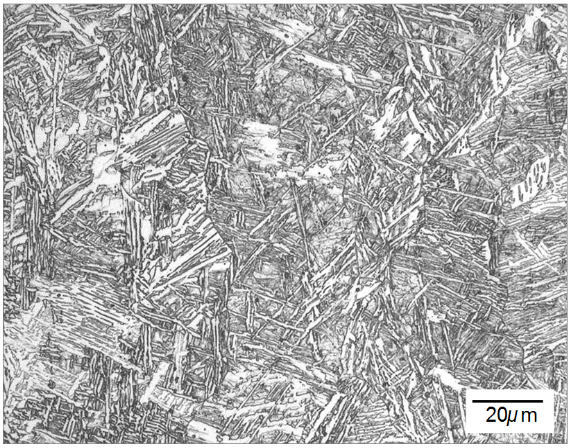
(b) Macro test result of STUD welding ; arrows indicate burr of weldment

Fig. 4. Macro test results of GMAW and STUD welding

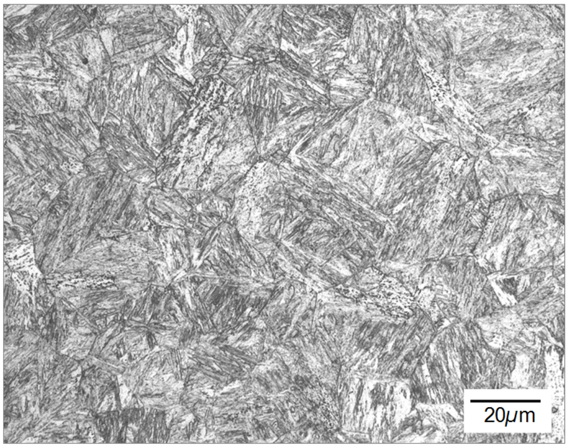
공법에 따른 용접부의 미세조직을 광학현미경을 통해 확인하였다. GMAW 용접부의 경우 일반적인 용접금속에서 확인할 수 있는 침상형 페라이트 조직으로 구성되어 있음을 Fig. 5의 (a)와 같이 확인할 수 있다. 반면, 스터드 용접부에서는 구 오스테나이트 결정립을 따라 마르텐사이트 조직이 형성되어 있음을 Fig. 5의 (b)와 같이 확인할 수 있다. 두 용접부의 열영향부는 Fig. 5의 (c)와 (d)에서와 같이 마르텐사이트 조직이 형성되어 있음을 확인할 수 있다.



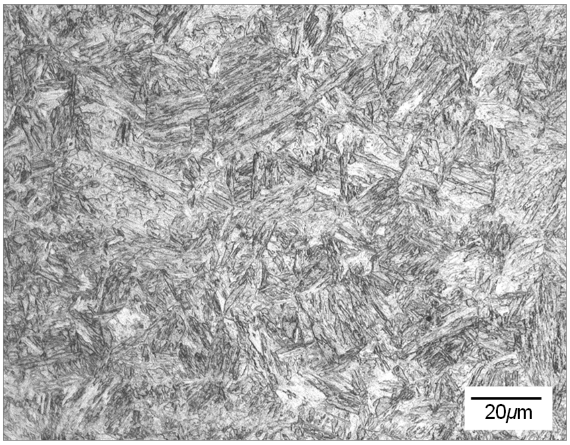
(a) Weld metal microstructure of GMAW(×500)



(b) Weld metal microstructure of STUD welding(×500)



(c) Heat Affected Zone microstructure of GMAW(×500)



(d) Heat affected zone microstructure of STUD welding(×500)

Fig. 5. Micro structure of GMAW and STUD weldment

3. 부분구조물 내구성 평가

차륜형장갑차의 경우 기동성과 생존성이 요구되며, 다양한 전장 환경에서 사용 된다. 중요 부품을 체결하기 위한 스터드 패드의 경우에도 다양한 환경에서 기동 중 외부 하중의 영향을 평가하여야 하며 특히, 차량의 사용주기에 따른 내구성을 확보하여야 한다. 이를 위해 Fig. 6과 같이 차륜형장갑차와 동일한 형태의 부분구조물과 실제 부품보다 4배 무거운 더비 부품을 이용하여 실제 차량이 사용 중 외부로 부터 받는 하중에 대한 피로시험을 수행하였다.

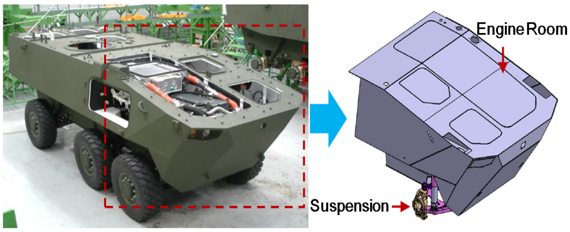


Fig. 6. Illustration of partial structure for durability test

3.1 부분구조물의 선정과 제작

부분구조물은 Fig. 6과 같이 엔진이 장착되는 우측 전방부를 선정하였으며, Fig. 7과 같이 FEA(Finite Element Analysis)를 통해 차륜형장갑차 구조물과 외부 하중에 대한 응력분포가 동일하도록 시험용 치공구를 제작하였다. 부분구조물은 실제 구조물과 동일하게 고경도장갑강을 이용하여 제작하였다. 시험용 더미 부품을 체결하기 위한 스터드 패드를 스터드 용접하였다. 또한, 용접된 스터드 패드에 실제 부품보다 4배 중량의 더비 부품을 체결하였다.

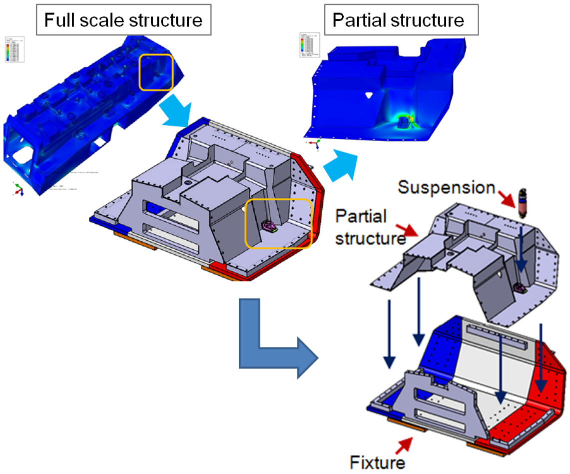


Fig. 7. Illustration of partial structure and test fixture ; FEM analysis for design of test fixture

3.2 피로시험용 하중 프로파일

피로시험용 하중 프로파일은 차륜형장갑차의 동체 구조물이 실제 사용기간 동안 포장도로, 비포장도로와 야지 조건에 분포된 6가지 장애물 조건을 통과한다고 가정하였다[10]. 또한, 해당 구조물의 수명주기를 체계 개발단계 조건인 32,000 km로 한정하였다. 차량이 장애물을 통과할 때 휠 이동거리에 따라 현수장치에 발생되는 하중이 구조물에 전달된다. 이를 외부하중조건으로 Table 5에 나타내었으며, 시험을 위해 가변 하중 조건으로 변환하였다. 휠 이동거리에 따른 현수장치에 발생되는 하중 조건은 Fig. 8과 같이 MSC.Adams를 이용하여 동역학 해석을 통해 산출하였고 이를 Table 5에 나타내었다.

3.3 피로시험

부분 구조물을 이용한 피로시험은 Fig. 9와 같이 100 ton 용량의 피로시험기를 이용하였다. 시험 전 스터드 용접부에 자분탐상검사를 통해 용접부 건전성을 확인하였으며, 시험 완료 후에도 자분탐상검사를 통해 스

터드 용접부에 발생된 균열 여부를 확인하였다. 시험 결과, 차륜형장갑차 주행조건에서 4배 중량의 더비 부품을 체결한 스터드 용접부에서 균열이 발생하지 않았음을 확인하였다.

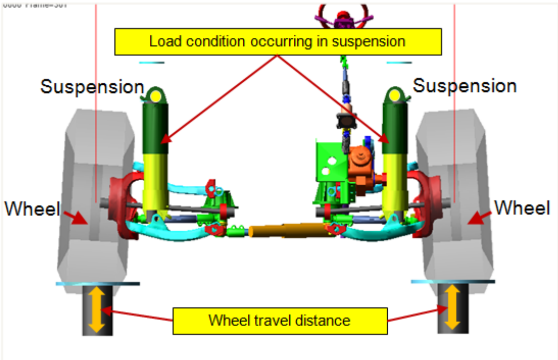


Fig. 8. FEM analysis for suspension and wheel

Table 5. Load profile for durability test

Distance (mm)	Load (kN)	Cycle (n)
24.0	42.6	1,400,000
47.0	47.9	280,000
63.0	52.3	200,000
79.0	57.5	80,000
94.0	63.1	80,000
110.0	70.2	20,000

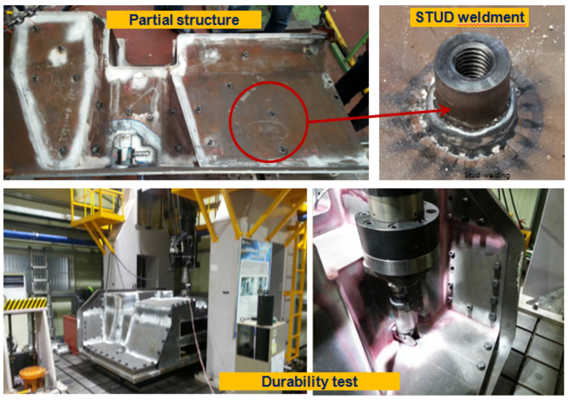


Fig. 9. Durability test on partial structure

4. 결 론

이번 연구에서는 고경도 장갑강에 대해 스터드 용접의 적용하고자 기존 용접부와의 기계적 성질과 경도, 미세조직등을 비교하였고, 부분 구조물을 이용하여 차량 기동조건에서의 스터드 용접부에 내구성능을 평가하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 용접부와의 기계적 성질 평가 결과, 기존 GMAW 용접 방식과 비교하여 우수한 인장강도와 동등한 수준의 전단강도를 확인하였다.

(2) 용접방식에 따른 용접부의 미세조직 확인 결과, 열영향부에서는 마르텐사이트 조직이 공통적으로 확인되었으며, 스터드 용접의 용접금속부에서는 마르텐사이트 조직이 그리고 GMAW 용접부에서는 침상형 페라이트등이 분포하고 있음을 확인하였다.

(3) 부분 구조물을 스터드 용접부의 내구성능 평가 결과, 실제 차량의 사용수명 주기 동안 외부로부터 받는 하중조건에 대한 안정성을 확인하였다.

References

[1] K. Kim, S. Kim and P. Kim, “A Development Study on Welded Stud-Bolt for Column-Beam Connection of Steel Structure,” Journal of The Architectural Institute of Korea, Vol. 2, No. 4, pp. 125-133, 1986.

[2] H. Oh and C. Yoo, “Analysis of CD Stud Welding Process and Defects - Part 1 : Process Modeling and Analysis,” Journal of The Korean Welding&Joining, Vol. 24, No. 3, pp. 34-41, 2006.

[3] H. Oh and C. Yoo, “Analysis of CD Stud Welding Process and Defects - Part 2 : Control of Void,” Journal of The Korean Welding&Joining, Vol. 24, No. 3, pp. 42-48, 2006.

[4] Y. Lee, Y. Ko, S. Yoo and C. Lee, “Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Au Stud Bump Joined by Flip Chip Bonding with Sn-3.5Ag Solder,” Journal of The Korean Welding&Joining, Vol. 29, No. 6, pp. 65-70, 2011.

[5] K. Lee, C. Joh, E. Choi and J. Kim, “Stud and

Puzzle-Strip Shear Connector for Composite Beam of UHPC Deck and Inverted-T Shear Girder," Journal of The Korean Concrete Institute, Vol. 26, No. 2, pp. 151-157, 2014.

[6] N. S. Anderson and D F Meinheit, "Design Criteria for Headed Stud Groups in Shear: Part 1 - Shear Capacity and Back Edge Effects," PCI Journal, Vol. 45, No. 5, pp. 36-45, 2000.

[7] H. A. Chambers, "Principles and Practices of Stud Weldings," PCI Journal, Vol. 45, No. 6, pp. 46-58, 2001.

[8] Welding Handbook, English Edition, Vol. 2, Welding Process Chapter 9, Stud Welding, American Welding Society, Miami, FL, pp. 300-327, 1991.

[9] TACOM Drawing 12479550, Ground Combat Vehicle Welding Code-Steel, 2006.

[10] H. Yi and Y. Shin, "Investigation of Imprving Durability and Productivity of Wheeled Vehicle Structure," KIMST Annual Conference Proceedings, Autumn, 2015.