

레이저 가공기술을 이용한 도시철도차량 제작 기술 개선에 대한 고찰

A Study of the Production Technique Improvement for EMU Using Laser Material Processing

정종덕***
Chung, Jong-Duk

김원경**
Kim, Won-kyung

홍용기*
Hong, Yong-Ki

편장식****
Pyun, Jang-Sik

ABSTRACT

This paper deals with the effect of laser material processing on the EMU production technique. Material processing with lasers takes advantage of all the characteristics of laser light. The high energy density and directionality achieved with lasers permits strong localized heat- or photo-treatment of materials with spatial resolution below one micrometer. The pulsed and mono-chromatic light allows the control of depth of heat treatment or selective excitation. The laser beam can be moved to process large areas, is a sterile tool and is no subject to wear and tear. Using laser processing have taken more interests in EMU production for improving the rigidity, weight reduction, crash durability, and cost savings so that their application to auto-bodies has been increased.

1. 서론

레이저 가공은 집속된 레이저 빔에 의하여 재료를 가공하는 것인데 주로 고밀도의 열원으로 레이저를 사용한다. 레이저 빔을 물체의 표면에 조사하면, 재료 표면의 온도가 급격히 올라가 표면 근처가 용융 됨과 동시에 증발됨으로써 물질이 제거되어 가공이 이루어진다. 레이저는 가공하려는 부분에만 매우 큰 에너지를 유지시킬 수 있어 많은 부분을 균일하게 가열시켜야 하는 통상적인 방법보다 가공이 빠르고 독특한 조직을 얻을 수 있다. 또한 부품의 내부에 열로 인하여 야기되는 열응력, 뒤틀림 및 균열 등을 방지할 수 있어 부품의 손상을 최소한으로 할 수 있다.

전동차의 구조체와 대차는 복잡한 형상을 갖는 용접구조형 구조로서 아크용접, 전기저항용접 등으로 용접되어 제작되어진다. 제작된 구조체는 최대승객하중의 운행조건 하에서 시스템의 기능을 만족하도록 강성 및 강도를 갖도록 하여야하므로 많은 보강재가 사용하게 되며 형상 또한 복잡하게 되어 가공도 어려워지게 된다. 그러한 문제점을 보완하기 위해서 자동차나 조선 등에서는 레이저를 이용하여 용접이 이루어지고 있는 추세이나 철도차량은 용접구조물로 용접이 타제품보다 많은 비중을 차지하게 된다. 용접구조물의 문제인 용접부의 열영향에 대한 취성으로 인한 기계적 성질의 저하 및 많은 부재의 사용으로 인한 부재의 수 증가를 해결해야 하는 문제점이 대두 된다. 레이저는 복잡한 형상의 가공과 용접이 타 용접보다 우수하고 용접부의 열영향에 대한 영향이 적어 취성이 거의 없고, 가공면이 깔끔하며, 차량의 경량화와 철도차량 부품의 가공도 가능하므로 철도차량 가공 공정 및 단품 가공에 기존의 가공 방법 대신 레이저 가공을 사용하므로 철도차량 제작기술을 개선사항에 대하여 고찰하여보고, 이를 바탕으로 향후 철도차량제작에 적용될 수 있다는 가능성을 제시하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
**** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

2. 레이저 가공 방법

2.1 Laser Cutting 원리

레이저 절단의 원리는 레이저 빔이 렌즈 또는 거울에 의해 물체표면에 초점을 형성하여 국부적으로 가열하면 순간적으로 용융 내지 증발 현상을 초래해 이를 가스제트로 불어내면 절단이 이루어진다. 절단 과정에서 공구와 가공물간의 접촉이 없으며, 따라서 기계적인 힘이 가공물에 작용하지 않는다. 그러므로 공구의 마모현상이 없다.

레이저 빔은 초점의 크기가 마이크로미터 범위까지 수렴될 수 있으며 이러한 훌륭한 초점 형성 능력으로 인해 에너지의 밀도를 높일 수 있다. 따라서 레이저 절단은 다른 절단 방법에 비해 절단 속도가 빠르다. 동시에 가공물이 받는 열량이 적어 열변형 또는 조직변화 등이 극히 적다. 레이저 절단면의 특징은 가공물 표면에 거의 수직으로 절단면이 형성된다는 점과 낮은 표면 거칠기, 그리고 열영향부가 작다는 점을 들 수 있다. 따라서 대부분의 경우 절단 후 마감 가공이 필요 없다.

2.2 Laser welding

레이저에 의한 금속의 용접은 접합시키려는 금속을 용융점 이상으로 가열시켜야 하므로 표면가공에 비하여 훨씬 큰 레이저가 요망된다. 또한 용융 접합시키려는 구역 전체를 용융점 이상으로 유지시켜야 하므로 표면 온도를 가능하면 비등점 이하로 유지시키면서 열이 충분한 깊이까지 전달될 수 있도록 하여야 한다. 레이저에 의한 용접은 일반적으로 용접방법에서 가능한 금속 및 합금에 모두 적용된다. 즉 접합시키려는 금속들 사이의 용융온도가 비슷하고, 그들의 결정구조가 같으며, 상태도에서 고용체 합금을 형성할 때 쉽게 용접이 이루어진다. 따라서 다른 용접 방법들에 의한 이러한 이종 금속들 사이의 용접 용이도는 레이저에 의한 용접에도 적용이 된다. 그러나 레이저에 의한 용접에서는 짧은 시간에 작은 구역에 많은 열이 집중되므로 금속 표면이 국부적으로 비등점 이상으로 될 수 있다. 이것은 비등점이 낮은 아연 혹은 황동과 같은 금속과 용융점이 높은 다른 금속들 사이의 용접은 매우 힘들다는 것을 의미한다. 따라서 레이저에 의한 용접에서는 접합시키려는 금속에 따라 레이저 에너지 밀도와 조사시간 등의 조절에 세심한 주의가 요망된다.

2.3 Hardening

레이저 빔에 의한 재료 가공 방법 중에서 가장 작은 레이저 에너지 밀도가 요구되는 범주에 속한다. 이 가공 방법은 금속 표면에 조사된 레이저 빔에 의한 열원이 금속 표면 근방의 온도를 변태점과 용융점 사이의 온도로 가열 시키도록 한다. 그 후에 레이저 빔을 이동시키면 표면의 열은 곧 치밀하게 연속된 기지 조직 내부로 전달되어 가열된 구역이 급속도로 냉각된다. 이러한 기지 조직에 의한 자체적인 quenching 작용은 표면 구역의 정상적인 구상 변태를 억제시키므로 금속의 기지 조직에는 변화가 없이 표면 층만을 경화시키는 방법이다. 따라서 이 방법이 적용될 수 있는 재료는 용융 전에 고상 변태가 가능한 재료에서만 이어질 수 있다.

2.4 Cladding

단독의 금속재료(합금을 포함)의 기관에서는 요구되는 기능에 대응하지 않는 경우 기관의 장점을 살리면서 표면에 완전히 다른 재료를 배치하여, 재료를 복합화시키는 것으로 소정의 기능을 부가시키는 것이라 할 수 있다. 이와 같이 복합재료를 만들기 위한 기술을 클래딩(Cladding)이라 한다. 합금화법과 비교하면 보다 두꺼운 개질층을 부가할 수 있는 것이 특징이다. 레이저 클래딩법은 크게 2종류로 분류된다. 즉, 하나는 레이저 에너지만으로 소정의 클래드재를 용융하여 기관에 부착시키는 방법이며, 또 하나는 미리 용사(예를 들면, 플라즈마 용사)로 클래드층을 만들어 놓은 다음에 이 클래드층을 레이저로 재용융하여 품질 향상을 도모하는 방법이다.

3. 레이저를 이용한 철도차량 제작 기술의 개선 사항 고찰

3.1 기어커플링

3.1.1 개요

전동차의 동력차의 경우, 전인전동기와 드라이빙 기어(Driving Gear)사이에는 기어 커플링(Gear Coupling)은 상·하, 전·후 방향의 편차를 흡수하는 구조로 되어 있는데 이때의 흡수구조(Hub & Sleeve)는 기어의 치차각을 통해 이루어진다. 기어커플링은 6°의 큰 편차를 가진 기어커플링 구조로써 겹모양 형상이 바르고 기타 결함이 없어야 하며, 녹 발생 및 그리이스 등의 누유가 없어야 한다.

커플링의 예비운전 시험은 회전속도를 0에서 5,050 rpm 까지, 토크를 최고 500Nm 까지 증가시키면서 정, 역 방향으로 각각 30분씩 운전하며, 무부하 시험은 기어 커플링에 토크 및 변위를 전혀 주지 않은 상태에서 2,520 rpm 으로 정, 역 방향으로 각각 1시간씩 회전시키면서 온도상승, 이상음 발생 여부 및 그리스 누설 여부를 확인한다. 기어 커플링의 온도상승한계는 주위 온도 60℃이며, 어떠한 경우라도 온도상승결과가 80.℃를 넘지 않아야 하고, 또한 이상 소음이 발생하지 않아야 한다.

기어 커플링의 치면 마모는 71시간 동안의 각종 시험이 끝난 후 기어 커플링을 분해하여 기어 커플링의 치면 마모상태를 정밀측정하여 원활한 기어의 접촉을 확인하여야 하며, 치면의 마모량이 2μm을 초과하지 않아야 한다. 다음 그림1은 전동차용 기어커플링 구조를 나타낸 것이다.

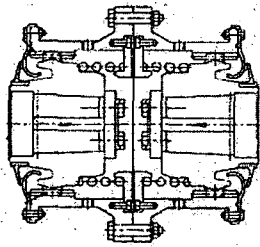


그림 1. 전동차용 기어 커플링 구조

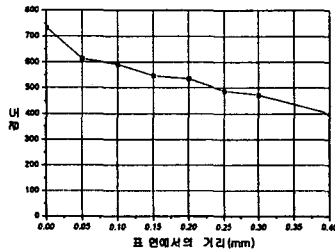


그림 2. 기어커플링(HUB)의 표면거리에 따른 치면 정도

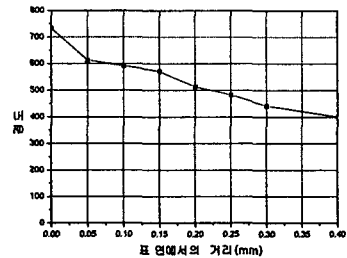


그림 3. 기어커플링(SLEEVE)의 표면거리에 따른 치면 정도

그림2와 3은 기어커플링 가공 후 표면거리에 따른 치면경도를 나타낸 것이며, 기존 가공방법에 의해 가공된 커플링 경도시험에 의한 기어 커플링의 HUB 치면 경도는 734(HmV100g), 화합물층 두께는 6-7(μ), 질화층의 두께는 0.6(mm), 중심경도는 287(HmV100g)이다. SLEEVE 치면 경도는 734(HmV100g), 화합물층 두께는 6-7(μ), 질화층의 두께는 0.6(mm), 중심경도는 285(HmV100g)이다.

3.1.2 기어 커플링 개선 방향

기어 커플링의 기존의 가공 방법대신 레이저 가공을 할 경우 레이저 빔이 수 μm 정도의 매우 작은 크기로 접촉시킬 수 있어 철도차량용 기어 커플링의 부품 중 Hub, Sleeve 치면의 정밀 가공이 가능할 것이며, 레이저는 질량이 없는 에너지 빔이므로 작업부분과 직접적인 접촉이 없어 커플링의 치면에 오염을 주지 않을 것이다. 기존의 기어 커플링 치면의 가공방법은 치면 가공 후 표면의 경도를 높이기 위해 열처리를 한다. 그러나 레이저 클래딩 가공을 하면 기어 커플링 치면에 내마모성, 내열성, 내식성을 갖는 코팅 층을 형성할 수 있을 것이며, 부품가공에 활용 가능할 것으로 본다.

3.2 구조체의 출입문 및 측골조

3.2.1 개요

전동차는 승객의 원활한 수송을 위하여 출입문을 측면당 4개소(1량 기준)로 설치되어 있다. 그림4는 여러 가지 부재로 용접된 출입문 및 측골조를 나타낸 것이다. 출입문은 개소가 많아 출입문의 개구면에는 하중을 부담할 수 있는 골조가 없어 출입문의 Entrance Frame를 보강하여 하중을 지탱할 수 있는 구조로 설계됨에 따라 보강 골조의 부재가 다양하고 형상도 각기 달라 작업공수가 많이 들어가고 경제적이지 못하다. 보강골조 부재의 수가 약 13개소이고, 맞대기 용접으로 Frame의 Ass'y를 제작한 후에 보강재(Gusset Plate)를 덧붙여 측골조 Ass'y를 만든 다음 하부골조 언더 프레임 Ass'y와 대조립을 하게 된다. 이때 출입문 Entrance Frame 부위는 후판으로 Spot Welding 작업이 어려워 Plug Welding로 대조립을 수행한다. Plug Welding 부위는 용접부의 용접 비드 등 표면이 매끄럽지 않아 미려도 측면을 고려하여 Spot Welding으로 용접하게 된다.

측골조는 하중을 받는 직각방향의 Side Post와 수평방향의 Side Frame으로 구성된다. 측골조 Side Post 와 Side Frame 연결시 접합부위에 보강재를 금형으로 만들어 Spot Welding으로 접합 후 다시 외판을 씌워 Spot Welding을 실시한다. 따라서 작업성 및 공수가 많이 발생하고 용접으로 인한 변형 및 재질의 특성상 기계적 성질이 현저하게 떨어짐을 구조체 하중시험 결과에서 알 수 있었다.



그림 4. 여러 가지 부재로 용접된 출입문 및 측골조

3.2.2 구조체 출입문 및 측골조의 용접 개선 방향

차량의 경량화를 위한 연구가 활발해지면서 알루미늄, 플라스틱 등 새로운 소재 개발이 활발하나 획기적인 소재의 혁명이 이루어지지 않는 한 철판을 이용한 차량이 주류를 이룰 것이므로 철판 자체의 효율적 활용으로 경량화를 이루는 것이 중요한 기술적 요건으로 떠오르고 있으며, 테일러드 블랭크 레이저 용접(Laser Weided Tailored Blanks) 방법을 이용하여 출입문 용접의 개선방향을 제시하고자 한다. 여기서, 테일러드 블랭크 레이저 용접(Laser Weided Tailored Blanks)이란, 현재 자동차에 사용하는 방법으로 각종 철판을 마치 양복을 재단하는 것과 같이 필요한 모양대로 절단하여 이를 레이저로 용접한 뒤 프레스 성형을 하는 일련의 공정을 말한다. 기존 패널제작 방식인 성형 작업이 끝난 철판을 점용접(Spot Welding)하는 방식보다 재료의 손실이 적고 디자인의 유연성이 높으며 작업 과정도 단순화 할 수 있는 차세대 패널 제작 방식이다. 용접 부재가 다양한 출입문을 테일러드 블랭크용 레이저 용접(Laser Weided Tailored Blanks)을 이용하면 구조체의 철판 개소, 두께, 재질이 서로 다른 경우에도 기존 점용접(Spot Welding) 보다 품질이 우수하고 원하는 강도의 용접 품질을 얻을 수 있을 것으로 본다.

3.3 대차프레임

3.3.1 개요

전동차 운행시 사용 전력 절약과 레일 부담하중 감소로 인한 선로 보수 비용을 최소화 하기 위해 차량구조물을 경량화하고 있다. 따라서 이러한 경량차량구조물은 피로강도가 설계상 중요한 문제가 되며, 대차의 견인전동기 프레임, 기어브라켓 프레임등은 복잡한 용접구조물로 이루어져 있으며 특히 이 부위에서 변동폭이 큰 하중이 작용한다. 철도차량용 주행장치(Bogie)는 차체의 하중을 지지하고, 여객 및 열차의 안전, 주행성능 및 승차감에 지대한 영향을 미치는 핵심 구조 부품으로서, 주행장치는 크게 대차틀, 차륜 및 차축, 현수장치, 제동장치, 전동기 및 동력전달장치 등으로 구성되며, 대차틀은 형상이 복잡하고 하중을 직접 지지할 뿐 아니라 하중조건도 정적 및 동적 하중이 복합적으로 작용하고 있다. 대차틀은 차체 자중에 의한 정 하중과 승객하중, 곡선주행, 제동 시 발생하는 준 정적 하중(Quasi-Static Load) 및 불규칙한 선로와 차체, 주행장치, Wheel set의 운동 Mode에 의한 동하중을 받고 있으며, 이런 여러 가지 하중으로 인해 응력이 집중되는 부분에 크랙 등의 결함이 발생한다.

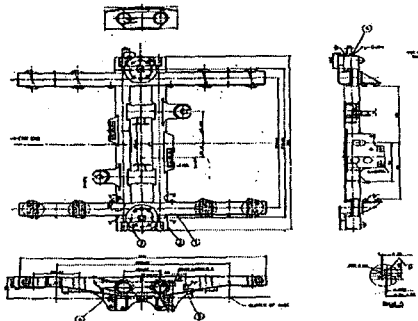


그림 5. 동력차 대차 프레임 주요 구조

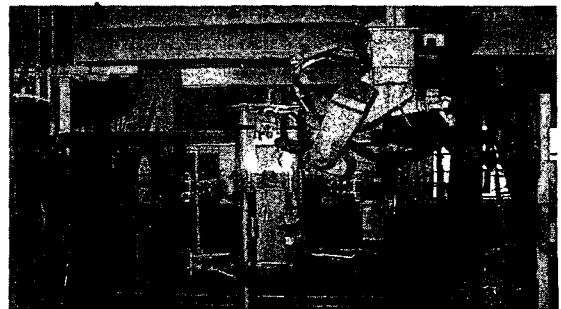


그림 6. 대차프레임의 Transom 파이프 로봇 용접

3.3.2 대차프레임 결함의 개선 방향

대차프레임은 정하중 및 동적하중을 직접 받음에 따라서 대차프레임에 장착되어있는 견인전동기, 드라이빙기어 등 중량물에 대해서는 용접부에 크랙이 가는 경우가 종종 발생한다. 현재의 용접 방법은 아크 용접과 전기 저항 용접 등으로 작업을 하고 있어 용접으로 인한 모재의 기계적 성질 저하가 발생됨을 알 수 있었다. 따라서 취성 및 기계적 성질을 유지할 수 있는 레이저 용접을 이용하면 레이저 가공이 비접촉 가공이므로 대차프레임에 기계적인 힘이 미치지 않을 것이고, 평행성을 이용 빔을 멀리까지 전달하여 깊은 곳까지 가공하여 기계적 성질을 향상시킬 것이며, 레이저 빔은 수 μm 정도의 매우 작은 크기로 집중시킬 수 있어 대차프레임의 복잡하도 정교한 가공이 이루어져 크랙이 발생하지 않을 것으로 사료된다.

3.4 차륜

3.4.1 개요

가공물(Ingots)을 절단(Cutting)하고 절단된 가공물을 가열(Heating)한 후 수압기(Hydraulic press)를 이용한 자유단조로 단면적을 크게하고 길이는 짧게하는 업셋팅(Upsetting)작업을 하며 다시 반복적인 압축으로 가공경화를 한다. 다음으로 틀을 이용한 성형공정(Preforming)을 거치고 가공면 표면을 매끄럽게 하는 연삭작업을 한다. 또다시 수압기(Hydraulic press)를 이용한 작업으로 차축을 압입할 수 있게 하기 위해 가공물에 구멍을 뚫는 피어싱 공정(Piercing)과 측면을 접시모양으로 만드는 주는 디싱공정(Dishing)을 거친다.

위의 공정을 거친 가공물은 형식로에 들어가게 되는데, 형식로에서는 가공물의 기계적인 성질을 위한 온도처리(Isothermal Treatment)가 이뤄지고 다음으로 담금질(Quenching)작업을 하여 가공물의 재질을 경화시키고, 뜨임(Tempering)처리를 하여 내부응력을 제거 및 인성을 부여한다. 다음으로 낙중시험(Falling Weight Test)을 하고, 시료를 채취한 후 물리적, 화학적 시험을 한 후 가공에 들어간다.

그림7은 차륜과 레일의 접촉형상을 나타내것이며, 그림8은 차량의 차륜마모형상을 측정하여 원형상태와 비교한 예를 나타낸 것이다. 측정데이터는 플랜지 마모 특성 분석을 위해 차호별 차륜의 마모량을 나타내는 플랜지두께(Sd)를 측정하고, 원형상태와 비교하여 그 증가분의 평균치를 구하여 플랜지 마모 대표 값으로 하였다.

휠 직경의 마모량은 주행누적거리가(55,965km) 적어 10,000km 기준으로 약 0.082mm 마모량이 발생하였으며, 휠 답면의 마모량은 주행누적거리가(9,730km) 적어 10,000km 기준으로 약 Sd=0.10567mm Sh=0.43069mm, Qr=0.27460mm 의 마모량이 발생하였다.

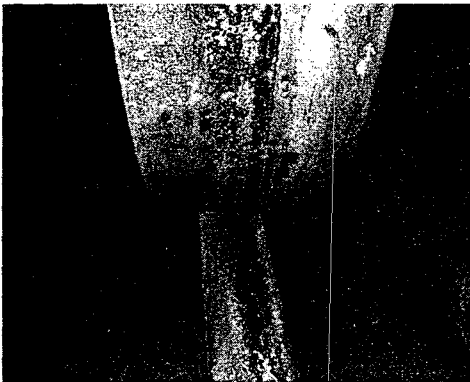


그림 7. 차륜과 레일의 접촉 형상

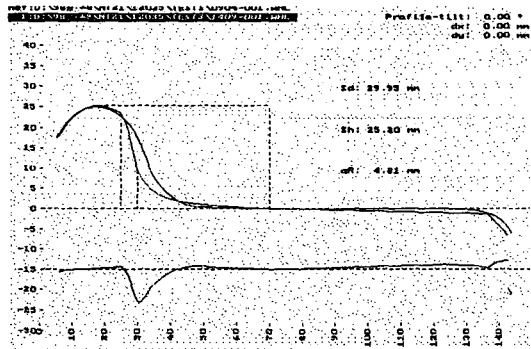


그림 8. 차륜플랜지 마모형상 측정례

3.4.2 차륜 가공의 개선 방향

차륜의 가공에 레이저 가공을 할 경우 플랜지 부위는 전동차가 곡선반경이 적은 곡선을 주행시, 원심력이 작용하여 횡압을 직접 받는 부위로 국부적인 마모가 심하게 나타난다. 마모량이 크면 레일과 플랜지 부위의 유격이 커져 전동차가 탈선을 할 수 있으므로 플랜지의 국부적인 마모량을 줄이기 위해서는 레이저 빔을 이용하여 플랜지 부위만을 열처리하는 방법 또는 클래딩 기술을 적용하는 것이 바람직 한 것으로 사료된다. 열처리방식을 레이저 빔으로 할 경우 전자적으로 쉽게 조정되며, 작업을 자동화 하기가 용이할 것으로 사료된다. 차륜의 일정기간 사용하면 그림8의 그래프와 같이 레일과 접촉하는 차륜의 일부분이 마모가 된 것을 볼 수 있다. 레이저 빔을 사용하여 가공을 하면 차륜의 정밀 가공이 가능 할 것이며, 또한 다른 어떤 열원보다도 큰 에너지밀도를 얻을 수 있어 가공과 동시에 열원에 의해 레일에 접하는 국부적인 부위만을 열처리 할 수 있어 사용에 따는 차륜의 마모량이 줄어들 것으로 본다.

4. 결론

기존의 가공 방법대신 레이저 가공기술을 활용할 경우 다음과 같은 개선사항이 있을 것으로 본다.

- 1) 기존의 기어 커플링 치면의 가공방법은 치면 가공 후 표면의 경도를 높이기 위해 열처리를 하는데 레이저 클래딩 가공을 하면 기존의 열처리 방법보다 높은 내마모성, 내열성, 내식성을 갖는 코팅층을 형성할 수 있을 것이다. 레이저 가공을 이용하면 기어 커플링의 정밀 가공이 가능하며, 작업부분과 직접적인 접촉이 없어 커플링의 치면에 오염을 주지 않을 것이다.
- 2) 플랜지의 국부적인 마모량을 줄이기 위해서는 레이저 빔을 이용하여 플랜지 부위만을 열처리하는 방법 또는 클래딩 기술을 적용하는 것이 바람직 한 것으로 사료된다. 열처리방식을 레이저 빔으로 할 경우 전자적으로 쉽게 조정되며, 작업을 자동화 하기가 용이할 것으로 보며, 다른 어떤 열원보다도 큰 에너지밀도를 얻을 수 있어 가공과 동시에 열원에 의해 레일에 접하는 국부적인 부위만을 열처리 할 수 있어 사용에 따는 차륜의 마모량이 줄어들 것으로 본다.
- 3) 출입문 골조의 개소가 많아 하중을 지탱할 수 있는 구조로 설계됨에 따라 보강 골조의 부재가 다양하고 형상도 각기 달라 작업공수가 많이 들어가고 경제적이지 못하다. 테일러드 블랭크 레이저 용접 방법을 이용하여 출입문 Entrance Frame 용접에서 기존 점용접(Spot Welding)하는 방식보다 재료의 손실이 적고 디자인의 유연성이 높으며 작업과정도 단순화 할 수 있을 것이고, 구조체의 철판 개소, 두께, 재질이 서로 다른 경우에도 기존 점용접(Spot Welding) 보다 품질이 우수하고 원하는 강도의 용접 품질을 얻을 수 있을 것이다.
- 4) 전동차 운행시 사용 전력 절감과 레일 부담하중 감소로 인한 선로 보수 비용을 최소화 하기 위해 차랑구조물을 경량화하고 있다. 취성 및 기계적 성질을 유지할 수 있는 레이저 용접을 이용하면 레이저 가공이 비접촉 가공이므로 대차프레임에 기계적인 힘이 미치지 않을 것이고, 평행성을 이용 빔을 멀리까지 전달하여 깊은 곳까지 가공하여 기계적 성질을 향상시킬 것이다.

참고문헌

- 1) Kelin J. Kuhn, "Laser Engineering", Prentice-Hall, 1998.
- 2) 김도훈, "레이저 가공학", 경문사, 2002
- 3) "분당선 철도차량 용접작업 기준서", (주)로템.
- 4) "분당선 Gear Coupling 검사성적서", (주)나라코퍼레이션