

다축제어를 이용한 모듈형 조향장치 하우징의 레이저용접에 관한 연구

김 중 도* · 이 창 제**

*한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부

**한국해양대학교 대학원

Study on Laser Welding of Automotive Modular Steering Gear Housing by using Multi-Axis Control

Jung-Do Kim* and Chang-Je Lee**

*Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Graduates School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

*Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received July 31, 2008 ; Revised October 22, 2008 ; Accepted December 1, 2008)

Abstract

Recently, automobile parts progress with modularization, which a great many allied products are modularized. Therefore, the purpose of this study is to develop modular housing for modularization of steering gear. Generally, steering gear housing is composed of valve housing and rack housing, it is important to combine two housings. However, housing having the pipe shape is very sensitive to welding distortion, and welding trajectory is very complicated. In order to solve this subject, cooperative control by using robots was constructed. Further, we developed the dedicated system to suit modular housing based on it, and applied laser welding to there. Moreover, welding speed was controlled in the rapid curve section so that the defect in trajectory of housing was reduced to obtain sound weldment. Accordingly, produced housing by this way is presented enough withstanding pressure to 100kg/cm², and roundness and straightness are measured about 10/100 and 0.9/100 respectively.

Key Words : Modular housing, SAE1020 steel, Cooperative control system, Dedicated system, Laser welding, Welding speed control, Roundness

1. 서 론

국내 자동차 산업의 발전은 부품소재산업의 견인차 역할을 하고 있다. 그러나 자동차 시장의 경쟁이 날로 치열해지면서 제품의 품질 및 가격을 동시에 만족시키고자 하는 요구가 날로 높아지고 있다. 이를 위해 각 부품의 모듈화가 진행되었거나 진행중^{1,2)}이며, 조향장치 또한 시대적 흐름에 발맞추어 모듈화가 진행되고 있다. 모듈화의 시작은 케이스나 하우징 등을 일체화하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 조향장치의 모듈화를 위해

모듈형 하우징을 제작^{5,6)}하는 목표를 두고 있다.

조향장치 하우징은 랙하우징(rack housing)과 밸브하우징(valve housing)으로 이루어져 있으며, 기존에는 각각을 조립하여 하나의 제품을 완성하였다. 그러나 모듈화를 위해서는 두 하우징을 하나로 통합할 필요가 있으며, 이때 가장 문제시 되는 것은 하우징 결합부의 용접궤적이 복잡하다는 것과 용접시 발생하는 변형^{3,4)}이 제품의 품질에 매우 민감하게 작용한다는 것이다.

특히, 하우징의 형상이 구형(球形)이기 때문에 용접 변형의 제어가 난해하며, 두 하우징이 직교하지 않고 일정각을 가지고 교차하기 때문에 용접궤적 또한 단순

하지 않다⁷⁾. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 모듈형 하우징에 최적화된 다축제어 시스템과 저변형 용접이 가능한 레이저를 시스템^{8,9)}에 적용하여 시제품을 제작함으로써 모듈형 하우징의 제조에 관한 토대를 마련하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 재료는 절삭성과 내마모성이 뛰어난 기계구조용 강재인 SAE1020강을 사용하였다. SAE10xx강은 일반적인 경질용 탄소강으로써 망간(Mn)이 최대 1.00%까지 첨가된다. Table 1은 실험에 사용된 SAE1020강의 화학적 조성을 나타낸다.

실험에서 사용한 시편은 비드용접시 150×45×4.2mmt, 필릿용접시에는 150×45×3.5mmt의 크기로 각각 재단하여 실험을 행하였다.

다음으로 비드용접시와 마찬가지로 SAE1020을 사용하여 Fig. 1과 같이 랙하우징과 밸브하우징으로 인발가공(drawing)하였다.

가공된 랙하우징의 길이는 540mm, 밸브하우징의 길이는 110mm 였으며, 두 하우징의 직경은 50mm로 제작되었다. 특히, 두 하우징의 교차부는 직교하지 않고 76.3°의 기울기를 가지고 결합되므로 각 교차점마다 원주율이 변화하여 용접형상이 매우 복잡한 양상을 띠게 된다.

2.2 실험방법

실험에는 CW Nd:YAG레이저를 열원으로 사용하였

Table 1 Chemical compositions of SAE1020 steel

Element Material	C	Si	Mn	P	S	Fe
SAE1020	0.19	0.2	0.39	0.015	0.008	bal.

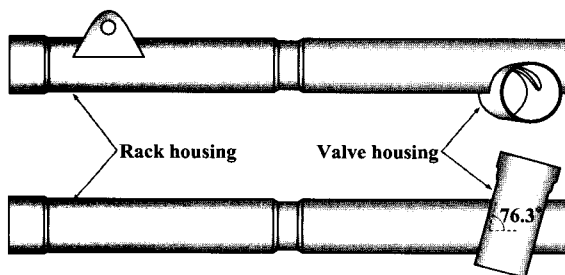


Fig. 1 Schematic illustration of monolithic housing

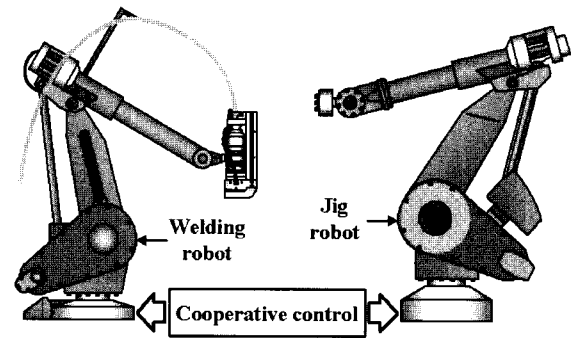


Fig. 2 Schematic of the cooperative controlled robot system with laser heat source

으며, 우선 재료와 열원간의 기초물성을 파악하기 위해 비드용접을 실시한 후, 이를 바탕으로 모듈형 하우징의 용접부와 유사한 필릿용접을 실시하여 적절한 가공인자를 도출하였다.

다음으로 모듈형 하우징의 용접레적의 분석 및 시제품 제작을 위해 Fig. 2에서와 같이 두 대의 로봇을 동기화 협제어 시스템을 구축하여 모듈형 하우징을 제작한 후, 이를 바탕으로 모듈형 하우징에 적합한 전용 시스템을 구축하였다.

이후, 전용 시스템으로 제작된 모듈형 하우징은 3차원 스캐너를 이용하여 진원도(roundness) 및 직진도(straightness)를 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비드용접특성

CW Nd:YAG레이저용접의 주요 가공인자인 비초점거리(f_d), 출력(P) 및 용접속도(v)에 따른 용입특성을 검토하였다.

우선 키홀이 형성되는 조건에서 비초점거리에 따른 용입특성의 분석결과, 초점거리에 따른 영향이 크지 않아 실험은 초점에서 실시하였다.

다음으로 출력 및 용접속도 변화에 따른 용입특성을 Fig. 3에 나타낸다. 출력은 1.0kW에서 2.0kW까지 0.5kW간격으로 하였으며, 용접속도 200mm/min에서 500mm/min까지 50mm/min의 간격으로 용접을 실시하였다.

용입깊이의 변화는 Fig. 3(a)에서 보듯이 1.0kW에서는 속도와 관계없이 2,000 μ m였다. 1.5kW에서는 300mm/min이하에서 모두 완전용입이 되었으며, 350mm/min부터 500mm/min까지는 약 2,800 μ m의 용입을 얻었다. 또한 그래프에는 표기하지 않았지만 2.0kW에서는 모두 완전용입용접이 되었다.

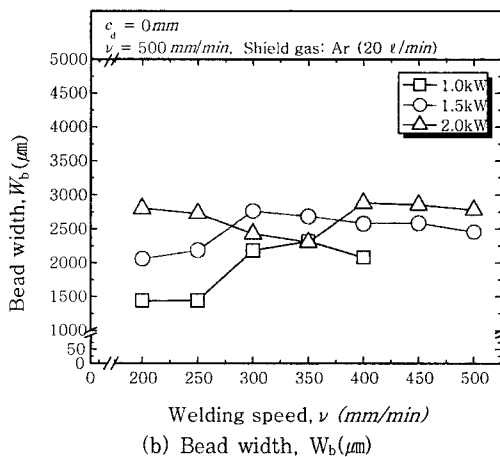
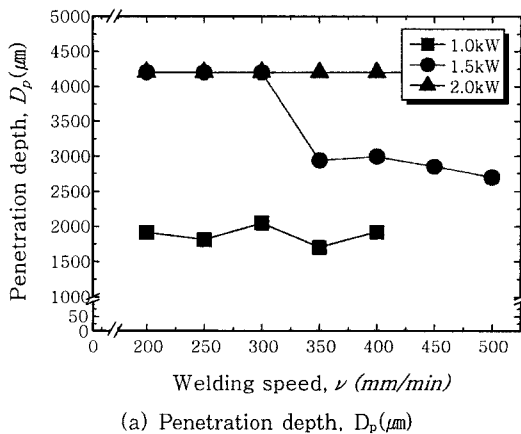


Fig. 3 Effects of power(P) and welding speed(v) on bead size in bead welding

비드폭은 Fig. 3(b)에서와 같이 1.0kW와 1.5kW의 경우에는 300~350mm/min까지 비드폭이 서서히 증가하였다. 또한 2.0kW에서는 약 2,700 μm 의 균일한 비드폭을 나타냈는데, 이는 판통용접에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 모듈형 하우징의 두께 및 형상을 고려하여 출력은 1.5kW, 용접속도는 500mm/min을 선정하였다.

3.2 필릿용접특성

필릿용접은 모듈형 하우징의 결합부와 매우 유사한 형상으로 판단되어 실제 적용을 위한 용접조건을 도출하는데 이용하였다.

필릿용접 조건은 비드용접에서 얻어진 결과를 적용하였으며, 레이저 필릿용접의 주요 가공인자인 조사빔의 입사각(α)과 필릿 루트부(fillet root)의 간격(l)에 대한 용입특성을 검토하였다. 필릿용접시 모재와 집광광학계 헤드의 각도(α)는 18°에서 45°까지 3°씩 변화시켰다. 그리고 필릿 루트부와 빔스폿과의 간격(l)은 0~

1,400 μm 까지 200 μm 씩 증가시키면서 용접을 실시하였다.

필릿용접시 조사각에 따른 용입특성은 Fig. 4에서 보듯이 조사각이 30°를 넘어서면 접합길이가 비드폭보다 작아졌으며, 18°에서 최대 약 2,500 μm 의 접합길이를 얻을 수 있었다. 그러나 18°에서는 비드의 외관에 언더필과 같은 결함이 종종 발견되어, 약 2,300 μm 의 접합길이를 나타내는 21°~27°의 중간값인 24°를 조사각으로 선정하였다.

다음으로 레이저빔의 조사위치를 필릿 루트부에서 200 μm 간격으로 1,400 μm 까지 이동시켰을 때의 용입특성을 Fig. 5에 나타낸다.

필릿 루트부와 레이저빔의 조사간격이 멀어질수록 접합길이는 증가하였으며, 1,200 μm 를 벗어나면 용접비드가 필릿의 루트부를 벗어나기 때문이다. 그러므로 경계값이 1,200 μm 보다 비슷한 접합길이를 갖는 800 μm ~ 1,200 μm 사이의 중간값인 1,000 μm 를 필릿 루트부와 레이저빔과의 조사간격으로 선정하였다.

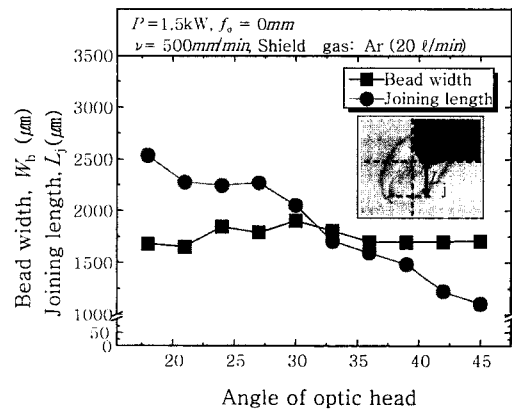


Fig. 4 Welding properties with irradiation angle of laser beam in fillet welding

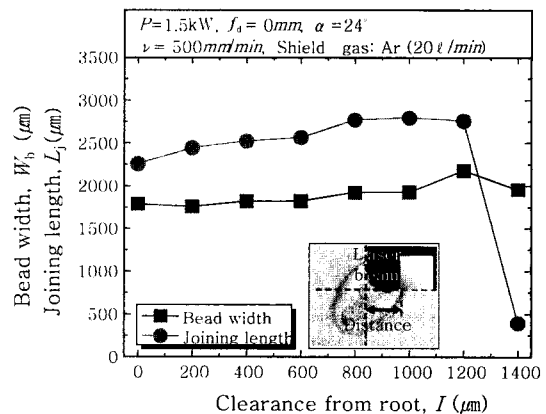


Fig. 5 Welding properties with clearance from fillet root in laser fillet welding

3.3 모듈형 하우징의 용접시스템 구축

모듈형 하우징은 기존에 생산되고 있는 제품과는 달리 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 피니언기어(pinion gear)와 랙기어(rack gear)의 기어이(gear tooth) 물림이 76.30°로 일정각을 이루고 있기 때문에, 기어를 지지하는 벨브하우징과 랙하우징의 형상이 제품의 설계상 직교하지 않고 76.30°의 기울기를 갖는다.

따라서, 하우징간 결합부의 원주길이가 위치마다 달라 용접선의 궤적이 매우 복잡한 형상을 가지고 있다. 이는 직선이송이나 단순 회전운동을 하는 기존의 전용 지그로는 모듈형 하우징의 용접이 어렵하는 것을 뜻한다. 때문에 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 두 대의 로봇을 이용하여 가공품이나 용접기에 상당한 자유도를 부여함으로써 위치별로 다른 원주길이를 추종할 수 있게 협조 제어시스템을 구현하였다.

그 결과 Fig. 6과 같은 용접궤적을 추종할 수 있었다. 그러나 이러한 시스템은 구축비용이 고가일 뿐만 아니라, 제품의 형상에 따른 로봇의 교시(teaching)가 어려워 높은 숙련도가 요구된다. 이는 실제 제품의 적용시 설계변경에 따른 로봇제어의 어려움으로 현장의 적용에 많은 어려움이 따른다.

따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해 모듈형 하우징에 최적화된 전용 시스템을 구축하였다. 특히, 모듈형 하우징용 전용 시스템은 이미 협조제어 시스템에서 확인한 용접궤적을 기준으로 각 축의 운동성을 검토·적용하여 설계하였다.

전용 시스템은 각축별로 직선이송 및 회전운동성을 부여하였으며, Fig. 7에서 나타낸 것과 같이 용접축

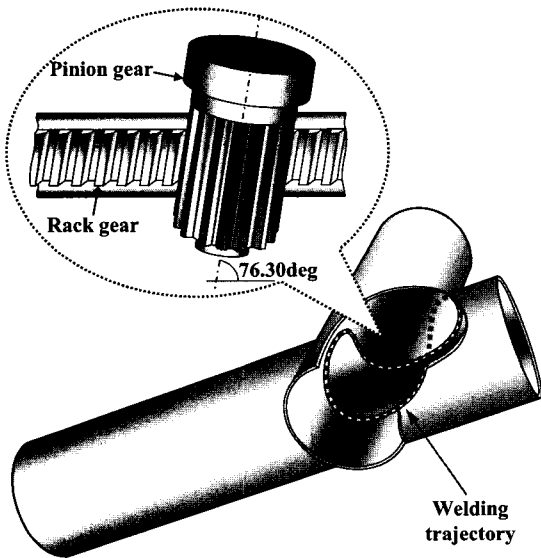


Fig. 6 Inner structure and welding trajectory of modular housing

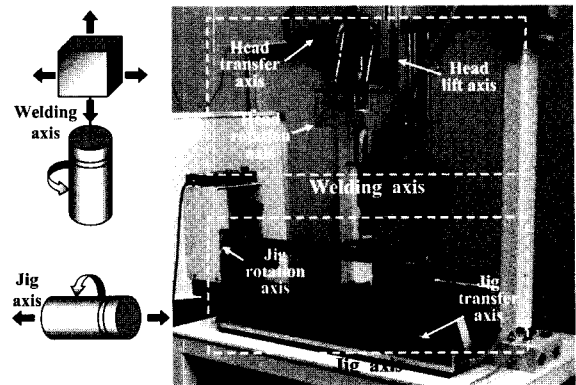


Fig. 7 Setup of dedicated system for modular housing

(welding axis)과 지그축(jig axis)으로 나누어져 있다.

용접축은 용접헤드 회전축(head rotation axis), 승각축(head lift axis) 및 이송축(head transfer axis)의 총 3축으로 이루어져 있으며, 지그축은 하우징 이송축(jig transfer axis)과 회전축(jig rotation axis)으로 구성되어 있다. 그리고 선반형(shelf type)으로 용접시 용접헤드가 피용접체에 대하여 항상 아래 보기 자세(flat position)를 유지하도록 하였다. 이렇게 조합된 축으로 용접헤드의 3차원 원주용접이 가능하였다.

이는 협조제어 시스템이 두 대의 로봇에 의해 총 12축을 갖고 있는데 반해 이를 바탕으로 새로이 구성한 전용 시스템은 5축만을 가지도록 효율적으로 설계하였다. 따라서 제어해야할 축이 반수 이상으로 감소되어 오퍼레이터의 운용부담이 다소 해소될 수 있으며, 기기의 정비 또한 효율적으로 이루어 질 수 있다.

이러한 전용 시스템의 하우징 용접시 각축의 이동 경로는 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 4축만으로 용접이 가능하였으며, 위빙(weaving)을 하지 않을 경우에는 헤드 승강축을 사용하지 않기 때문에 3축만으로도 용접이 가능하였다.

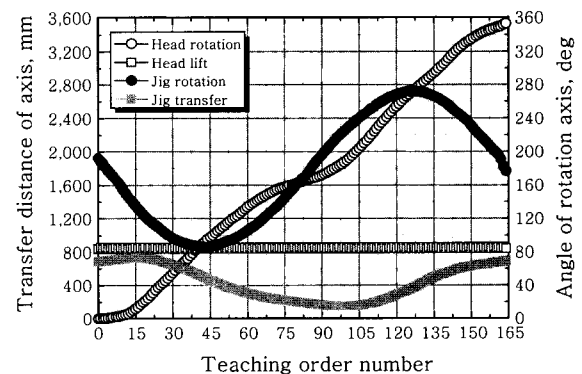


Fig. 8 Moving path with each axis in housing welding

각 축별 이동경로값은 용접헤드 회전축이 종료시까지 360°를 회전하며, 지그 회전축은 80°~270°를 반회전한다. 용접헤드 승각축은 제품의 특성상 850mm의 높이에서 초점위치에 고정되며, 지그 이송축은 730~150mm를 왕복하면서 하우징의 용접궤적을 추종하도록 하였다. 또한, teach-in 방식인 본 시스템은 총 164 point의 teaching point로 용접궤적을 추종할 수 있었다.

3.4 모듈형 하우징의 용접특성

전용 시스템과 레이저에 의해 용접된 모듈형 하우징은 Fig. 9에서 보듯이 접합부의 주요 부위를 8구간으로 나누어서 분석하였다.

모듈형 하우징의 레이저용접은 에너지가 집속되기 때문에 용접궤적에 따른 비드의 제어가 용이하지 않다. 특히, 곡률반경이 급격하게 변하는 ②, ④, ⑥ 및 ⑧의 급커브구간에서는 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 집광헤드의 원주이동에 대해 레이저빔의 초점은 원주의 중심축 부근에 있기 때문에 열축적에 의한 결함이 발생하기 쉽다. 따라서 이러한 커브에서는 레이저 파워나 용접속도 등을 제어하지 않으면 험핑이나 천공 등과 같은 결함이 유발된다. 특히, 결함이 발생된 부분은 백비드(back bead)가 형성되어 제품의 품질에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 레이저용접시 곡률반경이 급격히 변하는 커브구간의 처리가 매우 중요하다.

우선 전 구간을 동일한 조건으로 용접하였을 경우에

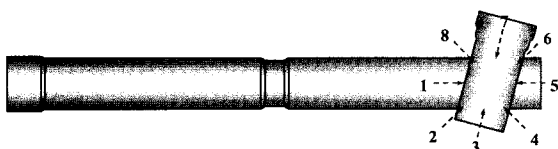


Fig. 9 Measuring position of weldment in modular housing welding

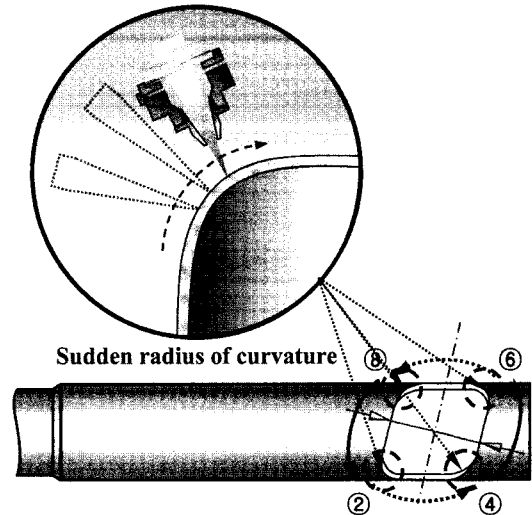


Fig. 10 Effect of sudden radius of curvature in laser welding

는 Fig. 11에서 보듯이 원주용접이 되는 ①, ③, ⑤ 및 ⑦부분에서는 별다른 결함을 발견하기 어려우나, 곡률반경이 급격하게 변하는 ②, ④, ⑥ 및 ⑧의 급커브구간에서는 험핑비드가 관찰되었다. 또한, 단면사진에서 보듯이 ②, ④, ⑥ 및 ⑧의 급커브구간은 집광헤드의 원주 이동에 의한 과대입열로 비드의 관통도 관찰된다. 따라서 모듈형 하우징의 레이저용접시 급커브구간이 있는 밸브 하우징 교차부의 입열제어는 건전한 용접부를 얻기 위한 중요한 제어인자로 판단된다.

따라서 밸브 하우징 교차부의 입열제어를 위해 전용 시스템과 레이저를 동기하여 용접속도를 제어하였다. 용접속도의 제어는 Fig. 12에서와 같이 ②, ④, ⑥ 및 ⑧구간에서의 용접속도를 $v=500\sim900\text{mm/min}$ 까지 증속 및 감속을 반복하였다. 이렇게 형상에 의해 입열이 축적되는 하우징 교차부는 Fig. 13에서 보듯이 용접속도의 제어에 의해서 입열을 제어함으로써 건전한 비드를 얻을 수 있었다. 또한 내부에 작동부를 고려하여 부분용입이 되도록 하였다.

Measured position	1	2	3	4	5	6	7	8
Photo								
Bead appear.								
Cross section								

Fig. 11 Bead appearance and cross section of weldment in housing welding

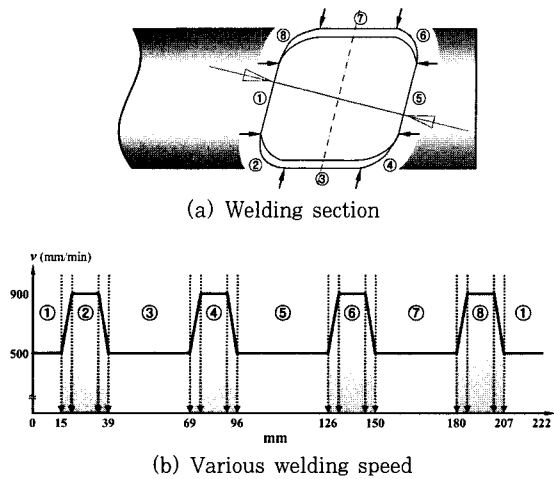


Fig. 12 Welding speed control in housing welding by using dedicated system

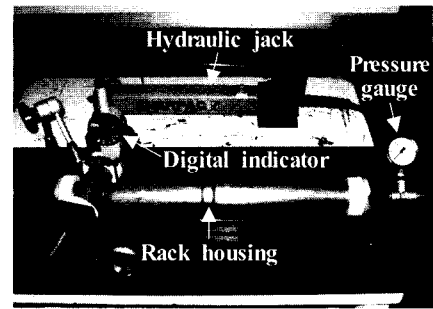
Measured position	2	4	6	8
Photo				
Bead appear.				
Cross section				

Fig. 13 Weldment of rapid curve section in welding speed control

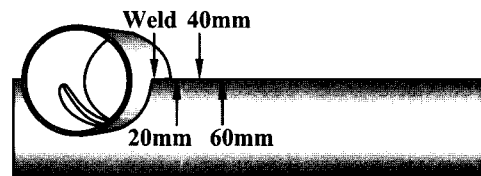
유압식 동력 조향장치 하우징의 작동압력은 약 25kg/cm²이며, 최대허용압력은 32.5kg/cm²으로 설계되어 있다. 때문에 하우징의 용접부 또한 설계압력을 견딜 수 있는 강도가 요구된다.

이에 따라, 본 연구에서는 용접된 하우징의 압력시험을 실시하여, 용접부의 누설정도 및 최대 허용압력을 측정하였다. 시험은 제작된 하우징을 밀폐한 후 압력을 가하면서 압력에 따른 하우징 외경의 변화정도 및 누설을 측정하였다.

압력에 따른 외경변화의 측정위치는 Fig. 14에 나타난 것과 같이 용접부에서 20mm간격으로 60mm까지 측정하였다. 측정결과는 Fig. 15에서와 같이 작동압력인 25kg/cm²에서는 약 1 μ m 정도의 부피팽창을 보였으며, 설계상의 최대허용압력인 32.5kg/cm²에서는 약 3 μ m 정도의 변형이 측정되었다. 다음으로 용접부의 최대허용압력을 측정하기 위해 지속적으로 압력을 증가시켰다. 그 결과 모재는 40kg/cm²부터 서서히 부피가 팽창하



(a) Setup of pressure test



(b) Measuring position of deformation

Fig. 14 Experiment setup and measuring position in pressure test

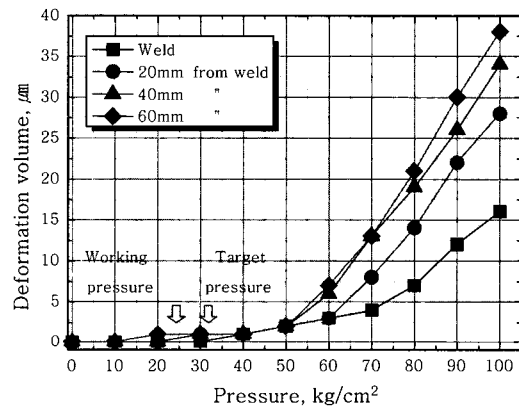


Fig. 15 Deformation of housing with various pressure

기 시작하여 실험을 위해 설치한 압력시험기의 최대값인 100kg/cm²에서는 약 38 μ m 정도의 변형이 측정되었으며, 용접부는 약 17 μ m 정도의 변형을 나타냈다. 또한 압력시험기의 최대측정 압력인 100kg/cm²까지 누설 없이 충분한 내압력을 보여주었다.

이러한 압력변화에 따른 모재와 용접부간의 변형량 차이는 Fig. 16에 나타난 것과 같이 용접부 형상에 기인한 구속과 정도차에 따른 것으로 판단된다. 그러나 정도분포에서 보듯이 용접부는 전형적인 레이저용접부의 정도특성을 나타내는데, 용접부의 정도가 모재대비 약 60Hv정도 높으나 그 폭이 매우 좁고 HAZ부가 작아서 압력에 따른 응력차로 용접부가 파괴될 가능성은 희박한 것으로 사료된다. 또한, 실제 작동환경인 25kg/cm²

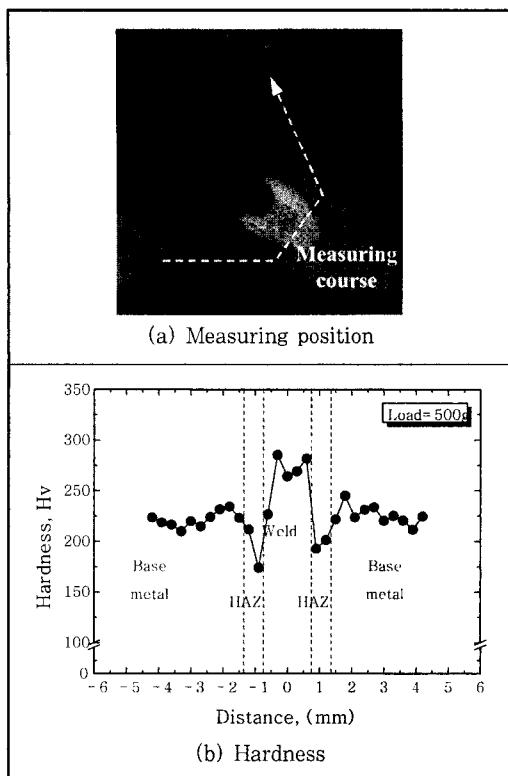


Fig. 16 Hardness distribution of weldment

에서는 변형률의 차이가 1μm 이하로 매우 작기 때문에 압력에 의한 변형정도는 무시해도 될 것으로 판단된다.

모듈형 하우징은 내부 유압 피스톤의 실린더 역할을 겸하고 있기 때문에 하우징의 진원도 및 직진도에 따라 오링(o-ring) 등과 같은 스텝부(sliding apparatus)의 마모수명이 결정되므로, 하우징의 진원도 및 직진도는 제품의 품질평가에 있어서 매우 중요한 요소이다.

따라서, 본 연구에서는 진원도 ±15/100 그리고 직진도 ±2/100를 목표로 하여 용접전과 후의 변형량 차이를 3D스캐너로 측정하였다.

진원도는 Fig. 17에 나타낸 것과 같이 밸브 하우징의 용접부 끝단으로부터 8mm와 90mm의 위치에서 용접부의 진원도를 측정하였다.

용접전 8mm와 90mm 위치에서의 진원도는 5/100 였으나, Fig. 18에서와 같이 용접 후 8mm는 12/100, 90mm는 3/100의 진원도가 각각 측정되었다. 또한 직진도도 Fig. 19에서 보듯이 용접 전·후의 측정값은 약 0.9/100로 나타나, 용접전의 변형값보다 약 10배 이하의 극히 미미한 변형량을 나타냈다. 이는 레이저용접이 하우징의 변형에 미치는 영향이 거의 없다는 것을 의미한다.

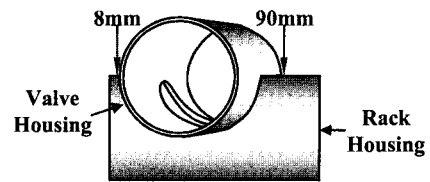


Fig. 17 Measuring position of roundness

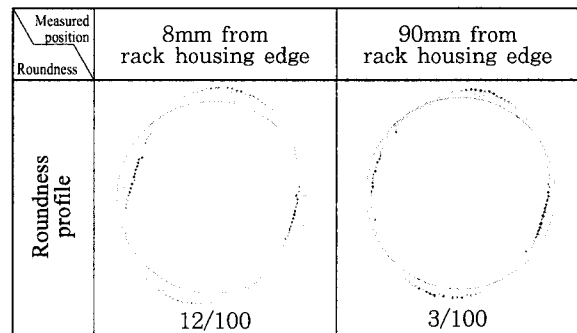


Fig. 18 Roundness of housing in laser welding

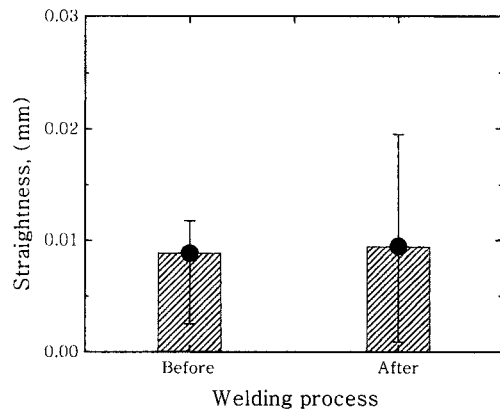


Fig. 19 Straightness of housing in laser welding

4. 결 론

조향장치 하우징의 모듈화를 위한 연구는 아직까지 보고된 사례가 전무한 실정이다. 또한 하우징 용접의 대부분은 아크용접에 의존하고 있어 용접변형에 많은 문제를 겪고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 전용시스템의 구축 및 레이저용접을 적용함으로써 용접부의 품질 및 변형을 획기적으로 개선할 수 있었다.

이러한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 모듈형 하우징의 결합부는 76.3°의 기울기를 가지고 있기 때문에 각 교차점에서의 곡률반경이 상이하므로 협조제어 시스템으로 용접궤적을 추종한 후 그에 따른 특성을 평가하였다.

2) 협조제어 시스템에서 얻어진 용접궤적의 특성을 바탕으로 전용 시스템은 직교하는 회전축을 갖는 총 5축의 장치로 구현하였다.

3) 하우징의 레이저용접시 급격한 곡률반경 변화에 따른 입열의 축적으로 결함이 발생하기 쉬운 급커브구간은 전용시스템의 용접속도 제어로 결함을 제어할 수 있었다.

4) 전용시스템으로 제작된 하우징은 100kg/cm²에서도 충분한 내압력을 보여주었으며, 최대허용압력인 32.5kg/cm²에서 압력에 따른 치수변화가 3 μ m로 매우 미미하였다.

5) 레이저용접된 하우징의 진원도 및 직진도는 약 10/100과 0.9/100로 변형이 매우 적은 용접품질을 나타내므로, 실제 적용시 매우 우수한 결과를 얻을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업중점기술개발 사업(과제번호:10018271)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Wan-Suk Yoo : Automotive Manufacturing Technology Module Assembly in Automotive Industries, Transaction of the KSAE, **24-4**(2002),14-21(in korean)
2. Ki-Chan Kim : Empirical Study on the Modurization and its Effects in the Automobile Industry, Journal of Commodity Science&Technology, **Vol.30**(2003), 113-140
3. Kyung-Ho Jang, Sung-Chul Yang and Hung-Woong Park : The Deformation Generated by Multi-Pass Welding in Steel Pipe, Proceeding of 2001 Annual Meeting of KWS, **Vol.1**, 161-164(in korean)
4. Jee-Seok Wang : A Study on the Stress and the Strain in Welding of Pipe, Journal of KSME, **4-2**, 63-69(in korean)
5. Jong-Do Kim and Chang-Je Lee : A Study on Welding Distortion in Processing of Modular Steering Gear Housing for Automobile(I), Proceeding of 2006 Spring Annual Meeting of KWS, 53-55(in korean)
6. Jong-Do Kim and Chang-Je Lee : A Study on Welding Distortion in Processing of Modular Steering Gear Housing for Automobile(II), Proceeding of 2006 Autumn Annual Meeting of KWS, 152-154 (in korean)
7. Jong-Do Kim and Chang-Je Lee : A Study on Welding Distortion in Processing of Modular Steering Gear Housing for Automobile(III), Abstracts of 2008 Spring Annual Meeting of KWS, 41(in korean)
8. Kyoung-Don Lee : 3D Laser welding and System Technology for Frame Structure, KOSEF(2002)(in korean)
9. Hee-Shin Kang and Jeong Suh : Development of 3D Laser welding system, Abstracts of 2005 Spring Annual Meeting of KSPE, 41(in korean)