

## 저항점용접과 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 피로거동 연구

정원욱\* · 정연수\*\* · 강성수\*\*\*

(1997년 5월 26일 접수)

### The Comparison of Fatigue Behavior of CO<sub>2</sub> Plug Weld and Resistance Spot Weld

W. W. Jung, Y. S. Jeung and S. S. Kang

**Key Words :** Resistance Spot Weld(저항점용접), CO<sub>2</sub> Plug Weld(CO<sub>2</sub> 플러그용접), Fatigue Failure(피로파괴), Reinforcing Method(보강법)

#### Abstract

Vehicle body structures are formed by thousands of spot welds and fatigue failure of vehicle structures occur near the spot welds after driving a long way at a durability test road. It is necessary to know accurately the reason of the fatigue failure of the spot weld in the developing stage in order to reinforce it. Many investigations have been done regarding the strength of spot welded joints, contributing to understand its fatigue strength. In developing process, a fatigue failed spot welded area can be repaired by CO<sub>2</sub> welding or another method to continue the test. To know the effect of reinforcing these welds, several methods of welding were analyzed and compared to spot welding. With the results of this test, the appropriate repair method can be used instead of spot welding during the development of new car and best design guide can be given for the strength. In this study, fatigue and static tensile tests are made and microstructure is investigated for the purpose of estimating the strength of welded joints by using spot welded and CO<sub>2</sub> plug welded specimens. The tested specimens are of two types: Tensile-shear type(TS) and L-tension type(LT).

#### 1. 서 론

자동차 메이커에서 새로운 차량을 개발하여 고객에 인도한 후, 보통 여러가지 조건의 도로에서 수년에서 수십년까지 사용되며 그 주행거리도 수십만 km에 달한다.

일반 운전자에 따른 차량의 사용조건은 대단히 다양하며 이런 운전자의 사용조건에 부합되는 내구

신뢰성을 갖도록 차량을 개발하는것은 당연하다.

고객이 만족할 만한 내구성이 우수한 차량을 개발하기 위해서는 여러 가지 내구시험을 수행하게 되고 이때 여러 불만족스런 문제점이 발견될 경우 가장 경제적이며 효과적인 보강방안의 마련이 필요하며 이 보강방안을 재확인하여 내구성에 문제점이 없다는 관정이 내려지고 난 후 신차개발 프로젝트는 완료되며 양산단계를 거쳐 고객에 인도되는 것이다.

승용차 한대의 조립에는 보통 4000여점 정도의 점용접이 적용되게 되며 승용차의 차체에서 발생하는 내구력상의 문제점중 일반적으로 70% 이상이

\*현대자동차(주)

\*\*LG전자(주)

\*\*\*회원, 부산대학교 기계공학부

점용접 주위에서 발생하게 된다.

이와 같이 점용접 주위에서 문제점이 발생하는 것은 점용접부의 응력집중이나 용접불량에 의한 균열요인 제공 등에 주로 기인한다.<sup>(1)</sup> 따라서 차체내구력을 담당하는 엔지니어로서는 점용접부의 정확한 특성이해나 피로거동 연구 및 분석이 필요하다. 신차 개발단계에서 프로토타입 차량에 의한 내구력 평가도중 점용접 주위에 균열이 발생되어 내구력이 부족하다고 판단되면 재프루빙하는 방법을 생각하게 된다. 이때 문제의 심각도 파손정도 등에 따라서 여러 가지 방법의 문제해결이 제시될 수 있는데 첫째, 설계를 변경한 다음 설계에 맞춰 시험용 프로토타입 차량을 신규로 제작하여 내구시험을 실시할 수 있다. 이는 내구력 만족여부에 대한 프루빙을 가장 정확히 할 수 있으나 도면변경에 의한 금형수정이나 간이 금형의 제작이 필요하며 이에 는 비용이 과다하게 소요되고 차량의 제작 및 제시함에 장시간이 소요되어 일정상의 지연이 발생하기 쉽다.

둘째, 문제된 부위를 국부적으로 재작업하는 것인데 이는 변경한 설계의 개념에 일치될 수 있도록 작업을 행하는 것으로 자동차 메이커 자체의 기술 축적이나 노하우의 적용이 요구된다. 즉 점용접한 부위에 문제가 발생되었을 경우 이를 설계 변경하는 방안으로 점용접을 몇점 추가하거나 보강판을 추가하는 등 여러가지 안이 나올 수 있으나 이미 제작 시험중인 차량에서는 여러가지 제약조건상 필요한 부위에 점용접이나 보강판을 추가로 적용할 수 없을 경우가 생기게 된다. 이때 점용접을 대신하여 같은 강도를 가질 수 있는 차체의 조립방법의 개발 및 적용이 요구된다. 이와 같이 정확히 원래의 설계 개념과 동일한 강도를 재현할 수 있는 보강방법이 개발된다면 시험용 차량의 추가제작 없이 내구시험 실시하고 있던 차량에 보강방안을 적용하여 재평가할 수 있고 시간적 경제적으로 많은 절감을 할 수 있을 것이다. 이의 달성을 위해 재현할 수 있는 여러가지 용접방법의 연구가 필요하게 된 것이다. 이 방법중의 하나로 CO<sub>2</sub> 플러그 용접의 채용이 검토될 수 있으며, 이에 대한 실험적 이론적 연구가 필요한 것이다.

점용접부 분석을 위해서는 용접부 단면을 절단한 후 너깃경을 측정하는 법, 초음파 투과에 의하여 너깃의 크기를 확인하는 법, 각종 인장시험, 피로시험, 펄스시험, 비틀림시험 등을 행하며, 이에 대한 연구 자료가 축적되어 가고 있다.<sup>(2~4)</sup>

**Table 1** Chemical composition of base metal.

Chemical composition(wt %)				
C	Mn	P	S	Al
0.04	0.25	0.01	0.005	0.05

**Table 2** Electrical and mechanical properties of base metal.

Electrical properties		
Resistance ( $\mu\Omega$ m)	Heat conductivity (w/m <sup>2</sup> °C)	Melting temperature (°C)
0.016	65	1539
Mechanical properties		
Y. S (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.S (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
18	30	40

CO<sub>2</sub> 용접은 CO<sub>2</sub> 가스에 의해서 용탕이 공기와 차단되는 아크용접법으로 금속의 용해는 용접되고 있는 모재와 연속적으로 공급되는 용가재의 전극선 사이에서 일어난다. 또한 플러그용접은 겹치기한 두 강판의 한쪽에만 구멍을 뚫고 그 구멍에 용접금속을 채워서 용접하는 방법이다. 그러므로 CO<sub>2</sub> 플러그용접은 위의 두 가지 개념을 합한 것으로 한쪽 판재에 일정한 직경의 구멍을 뚫은 후 CO<sub>2</sub> 용접을 수행하는 것으로 CO<sub>2</sub> 아크점용접(CO<sub>2</sub> arc spot welding)으로도 불린다. 실제로 차체의 판재가 두꺼운 대형차의 경우 점용접에 의한 접합보다는 CO<sub>2</sub> 플러그용접을 하는 경우가 많으며 점용접을 하기 어려운 부분에는 거의 CO<sub>2</sub> 플러그용접을 행하고 있다.

하지만 CO<sub>2</sub> 플러그용접에 관하여는 상대적으로 연구가 미비하여 용접성이나, 용접부위에 관한 강도에 대한 자료가 미미한 실정이다.<sup>(5)</sup>

본고에서는 단점 점용접 시편과 CO<sub>2</sub> 플러그용접 시편을 제작하여 인장시험, 피로시험 등을 통한 용접부의 강도에 대한 기초 자료를 축적하였다. CO<sub>2</sub> 플러그용접부의 경도분포, 조직, 열영향부 등에 관하여 면밀히 조사하여 이들이 강도에 미치는 영향을 고찰하며 피로수명과의 관계 등을 살펴봄으로써 CO<sub>2</sub> 플러그용접부와 점용접부가 같은 수준의 강도

Table 3 Spot welding conditions.

Force (kgf)	Tip (mm)	Current (kA)	Weld time (cycle)	Hold time (cycle)	Open time (cycle)
300	6	10	10	12	18

를 가질 수 있는 용접조건을 제시하고 피로강도에 대한 불확정성을 해소하고 피로수명을 향상시키기 위한 조건들을 찾고자 한다. 또한 재료의 미세적인 요인과 피로강도와의 상호관계를 고찰하고, 강도를 떨어뜨리는 불량 원인을 규명하여 그 대책을 수립함으로써 CO<sub>2</sub> 플러그용접부의 신뢰성을 향상하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료

본 연구에서 사용한 피용접재는 자동차 차체로 사용되어지고 있는 두께 1mm의 연강 SPCC를 사용하였다. 피용접재의 화학성분과 주요 전기적, 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 정리하였다.

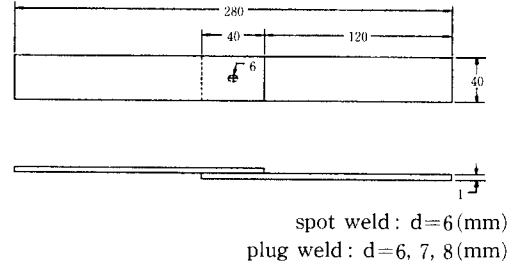
CO<sub>2</sub> 플러그용접시 용접 와이어(wire)는 JIS Z 3312에 규정된 YGW12를 사용하였는데 이는 탄산가스 아크용접용이며, 박판의 용접에 많이 사용된다. 시험편의 제작에는 직경 0.9mm의 것이 사용되었다.

### 2.2 용접 시험편 제작

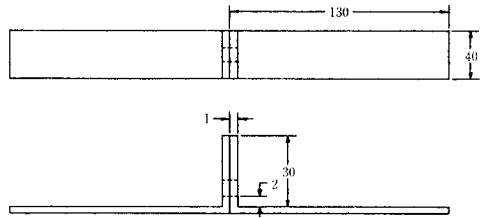
시험편의 용접은 자동차 공장의 현장에서 실시하였다. 본 실험에 사용된 점용접기는 공압식으로 정격용량이 150kV인 정치식을 사용하였으며, 용접 전극은 반구형(dome type)으로 외경 16mm, 용접 전극경은 6mm이다. 최적 점용접조건을 찾기 위하여 여러 가지 용접조건 하에서 제작된 단점 점용접 시험편으로 인장시험을 수행하였으며, 가장 큰 인장력을 가질때의 조건으로 제작하였다. 그 용접조건을 Table 3에 정리하였다.

시험편의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며 인장전단 시험편(Tensile Shear specimen, TS)과 L형 인장 시험편(L-type Tensile specimen, LT)을 제작하였다.

CO<sub>2</sub> 플러그용접 시험편은 반자동의 CO<sub>2</sub> 플러그용접을 수행하여 Fig. 1의 점용접 시험편과 같은



(a) Tensile shear specimen (TS)



(b) L-type tension specimen (LT)

Fig. 1 Dimension of specimens (unit : mm)

형상으로 제작하였다. 일반적으로 박판의 용접에는 직경 0.8~0.9mm의 용접 와이어를 사용하며, 전압은 16~22V, 그리고 전류는 60~160A의 조건에서 용접할 경우 박판에 대한 얇은 침투 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 본 실험에서는 전류 140A, 전압 20V의 조건에서 용접을 수행하였다.

CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우는 한쪽 판재에 뚫는 구멍의 크기를 직경 6mm, 7mm, 8mm의 세 가지 종류로 만들어 구멍의 크기와 강도와의 관계를 구하고자 하였다. (이후 각각 CO<sub>2</sub> 6, CO<sub>2</sub> 7, CO<sub>2</sub> 8로 표기)

### 2.3 실험방법

점용접 시험편의 피로강도를 측정하기 위하여 JIS Z 3138 규격에 따라 피로시험을 수행하였다. 피로시험기는 전기유압식 피로시험기인 SHIMADZU사의 SURVO-PULSER Model EHF-ED10-40L을 이용하였으며, 응력비 R=0의 편진인장의 조건으로 하중제어 피로시험을 실시하였다. 이때 하중

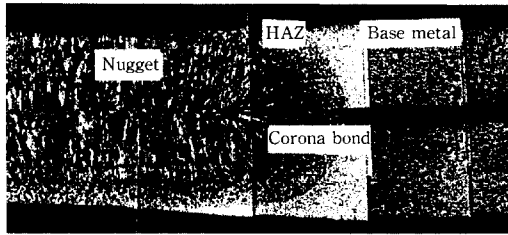


Fig. 2 Cross section of spot welding zone ( $\times 25$ ).

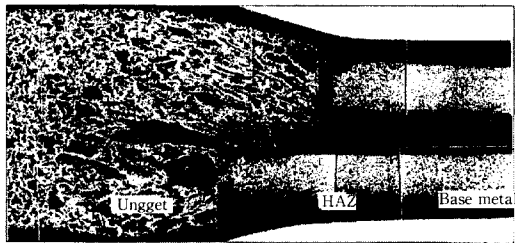


Fig. 3 Cross section of CO<sub>2</sub> plug welding zone ( $\times 25$ ).

의 반복수는 20 Hz로 하였다. CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우에 대하여도 같은 조건에서 실험을 수행하여 비교가 될 수 있도록 하였다. 피로시험을 끝내는 시기에 관하여 Ort<sup>(6)</sup>와 Wilson<sup>(7)</sup> 등은 두 판재가 분리되는 순간을 기준으로 삼았으며, McMahon 등<sup>(8)</sup>은 표면에서 균열이 관찰되는 순간을 최종 피로파괴 시점으로 보았다.

본 실험에서는 피로균열이 점용접부의 내부에서 발생, 성장하여, 외부에서 보았을 때 균열의 크기가 대체로 용접부 직경의 크기와 거의 일치하는 6 mm 정도에 달하는 순간을 최종 피로파괴 시점( $N_f$ )으로 삼았는데, 이는 Davison 등<sup>(9)</sup>의 기준과 일치하며 외부에서 관찰하기가 용이하며 플러그용접에서도 동일 조건으로 상대비교 하였다.

인장시험은 동일한 피로시험기를 사용하여 수행하였으며, 하중속도(loading rate)를 10 mm/min 로 하였다.

이러한 시험이 끝난 시편은 절단기(abrasive cutting machine)를 사용하여 축방향으로 용접부를 절단한 후 용착부의 크기를 측정하였다.

또한 조직의 관찰과 경도의 측정을 위해 부식액으로 5% 나이탈(nital)을 사용하였으며, 마이크로 비커스경도기(Micro Vickers hardness tester)를 사용하여 경도를 측정하였다. 경도의 측정위치는 판재의 접합면에서 0.25 mm 떨어진 위치에 0.5 mm 간격으로 경도를 측정하였으며, 이때 측정하

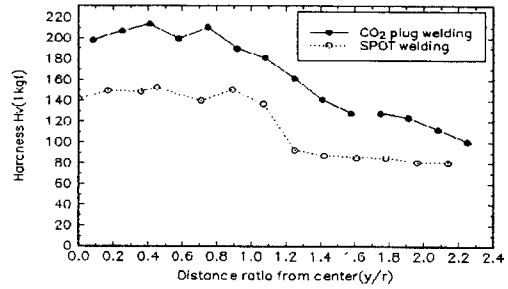


Fig. 4 Distribution of micro-vicker's hardness.

중은 1 kgf로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용접부위의 조직과 경도측정결과

점용접 시험편의 단면 조직을 촬영하여 Fig. 2에 나타내었다. 여기에서 보는 바와 같이 점용접부의 조직은 열영향부(HAZ: Heat Affected Zone), 너깃(nugget), 압접부(corona bond) 및 모재(base metal)로 구성되어 있음을 볼 수 있다. 또한 압접부는 약간의 비산(expulsion)이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 너깃은 마르텐사이트조직을 함유한 주상정조직으로 되어 있으며,<sup>(10)</sup> 열영향부는 짧은 시간 동안의 가열과 급랭에 의하여 재결정이 일어나 모재와 구별되어 나타난다.

CO<sub>2</sub> 플러그용접부위의 단면 조직을 촬영하여 Fig. 3에 나타내었는데 용착부(deposit)와 열영향부, 모재부분이 관찰되어 진다. 열영향부에서는 결정 조대화역이 나타나며 점용접부의 열영향부와 비교해보면 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우가 훨씬 넓은 범위에 걸쳐 열영향부가 존재함을 알 수 있다. 모재에 비하여 용착부의 부식정도가 더 크게 나타나는데 이는 용착부의 탄소함량이 모재에 비해 높기 때문이다. CS 분석기를 이용하여 탄소함량을 확인해 본 결과 용착부는 0.067 wt.%, 용접와이어는 0.093 wt.%로 나타났다. 이는 모재의 0.04 wt.%에 비하여 각각 67.5%, 132.5%가 더 높은 양이다.

점용접 시험편과 CO<sub>2</sub> 플러그용접 시험편의 경도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 경도측정위치는 용접부 중심에서의 거리(y)를 너깃의 반경(r)으로 나눈 무차원 변수(y/r)의 함수로 제시되어 있다. 경도는 전체적으로 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우가 크게 나타났다. 그리고 점용접의 경우는 너깃 근처에서 경도가 급격한 변화가 일어나며 너깃을 조금 벗어나면 모

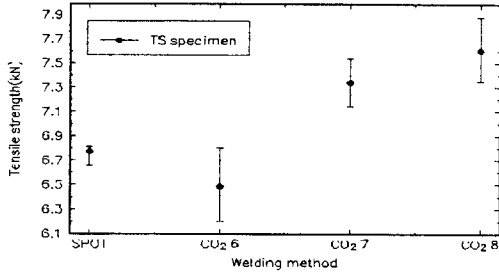


Fig. 5 The relationship between tensile strength and welding method for TS specimens.

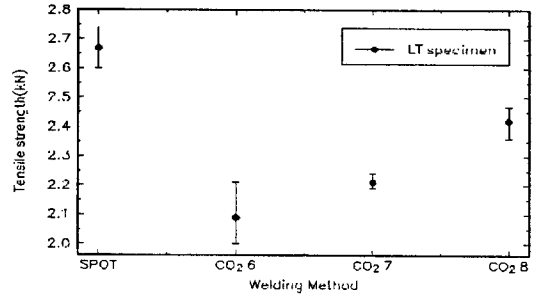


Fig. 7 The relationship between tensile strength and welding method for LT specimens.

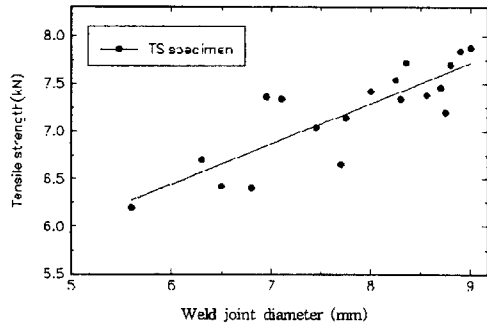


Fig. 6 The relationship between tensile strength and nugget diameter for TS specimen.

재의 경도와 거의 같아진다. 이렇게 너깃 근처에서 경도가 급변하게 되는 구역은 열영향부이며, 좁은 범위에 걸쳐 존재하게 되는 것은 조직사진을 통하여 관찰한 결과와 같다. 이렇게 좁은 열영향부가 나타나는 이유는 용접시간이 짧고 저항발열에 의하여 입열량이 너깃부근에 집중되며, 전극의 냉각수 순환과 시험편을 통한 빠른 냉각에 의한 급랭에 의한 것이다. CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우는 용착부 끝단에서 모재쪽으로 가면서 경도가 완만히 감소하고 있음을 보여준다. 이는 용접시간이 길고 넓은 범위에 걸쳐 가열되므로 용착부 주위에 넓은 열영향부를 갖게 되기 때문이다. 실제로 입열시간을 조사해본 결과 CO<sub>2</sub> 6, CO<sub>2</sub> 7, CO<sub>2</sub> 8의 경우 각각 2.46초, 3.13초, 3.80초 정도로써 10 cycle(1/6초)의 점용접의 경우에 비해 15~23배 길게 나타남을 알 수 있다.

또한 용착부에서의 경도가 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우가 높은 이유는 탄소함량이 많기 때문으로 판단된다.

### 3.2 점용접과 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 인장강도

인장전단 시험편에 대하여 인장시험을 수행한 결과를 Fig. 5에 나타내었는데 각 용접방법에 따른 데이터의 분포범위와 평균값을 보여주고 있다. 점용접은 좁은 데이터의 산포를 보이지만 CO<sub>2</sub> 플러그용접은 데이터의 산포범위가 넓게 나타난다. 또한 뚫는 구멍 직경의 증가에 따라 인장강도의 증가 경향이 뚜렷이 나타나며 점용접은 CO<sub>2</sub> 6의 경우보다 조금 높은 인장강도를 가지고 있지만 CO<sub>2</sub> 7, CO<sub>2</sub> 8보다는 낮은 인장강도를 보여주고 있다.

CO<sub>2</sub> 플러그용접을 행한 인장전단 시험편들의 용착부 직경과 인장강도와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 용착부의 직경 증가에 따라서 인장강도가 선형적으로 증가하고 있음을 잘 알 수 있다. 결국 CO<sub>2</sub> 플러그용접 인장전단 시험편의 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 용착부의 직경이며, 이는 小野英彦 등<sup>(5)</sup>의 결과와 일치한다.

L형 인장 시험편의 경우에 대한 인장시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. L형 인장 시험편은 인장전단 시험편에 비해 매우 낮은 인장강도를 나타내고 있다. 점용접의 경우가 가장 높은 인장강도를 보이며 CO<sub>2</sub> 플러그용접 시험편은 구멍의 직경 증가에 따라 인장강도의 증가 경향을 보여주지만 그 증가정도가 CO<sub>2</sub> 6의 경우와 비교하여 CO<sub>2</sub> 7의 경우가 5.7%, CO<sub>2</sub> 8의 경우가 15.7%에 불과하여 구멍의 크기에 따른 인장강도의 증가는 크지 않다. 이처럼 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우가 점용접의 경우에 비하여 낮은 인장강도를 갖게 되는 것은 시험편이 파괴되기 전까지의 소성변형 형태와 관계가 있다. 이는 점용접 시험편은 두 판재가 다 굽힘변형을 받아 변형이 일어났으나 CO<sub>2</sub> 플러그용접 시험편은 한쪽의 판재만이 굽힘변형을 받은 것을 확인할 수 있다. 즉 점용접 시험편은 국부적으로 같은 정도의

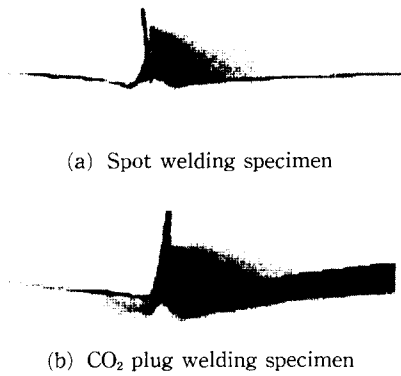


Fig. 8 Shape of statically fractured specimen

소성 굽힘변형후 어느 한쪽 판재에서 파괴가 시작되는 반면, CO<sub>2</sub> 플러그용접 시험편은 하부판재의 용착부 끝단이 상부판재에 비해 아주 작은 강성을 가지기 때문에 하부판재 하중작용선상의 용착부 끝단에 소성변형이 집중되어 소성흔지가 발생하게 되어 파괴가 시작된다. 또한 넓은 열영향부와 좋지 못한 표면상태에 의해 균열의 발생이 쉬워진것도 인장강도를 떨어뜨리는 원인으로 판단된다. 인장시험에 의해 최종 파괴된 L형 인장 시험편의 모습을 Fig. 8에 나타내었다.

3.3 점용접과 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 피로수명

3.3.1 인장전단 시험편에 대한 피로시험

인장전단 시험편의 각 용접방법에 대한 피로시험 결과를 비교하기 위하여 Fig. 9에 피로시험 결과를 종합하였다. 고하중 단수명영역에서는 점용접에 비하여 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우가 우수한 피로강도를 나타내지만 저하중 장수명영역으로 갈수록 이러한 차이가 작아져 비슷한 피로강도를 나타내고 있다. 인장전단 시험편의 경우 피로시험을 수행하게 되면 판재의 겹쳐진 부위가 모멘트에 의하여 굽힘을 받게 되어 회전각이 생기게 되는데 고하중의 경우는 회전각이 크고 저하중의 경우는 회전각이 매우 작게 발생한다. 고하중의 경우는 이러한 회전각이 커져감에 따라 용착부 끝단에 소성흔지가 발생하게 되어 결국 파괴에 이르게 된다. 점용접부와는 달리 CO<sub>2</sub> 플러그용접부는 보강부(reinforcement)가 존재하므로 고하중의 경우에 회전각의 발생을 억제하는 효과가 있다. 이 보강부의 회전각 억제효과에 의하여 고하중 단수명영역에서는 CO<sub>2</sub> 플러그용접이 더 우수한 피로강도를 나타내는 것이며 저하중

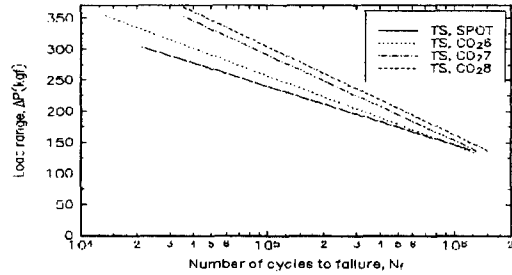


Fig. 9 The relationship between load range( $\Delta P$ ) and number of cycles( $N_f$ ) for TS specimens

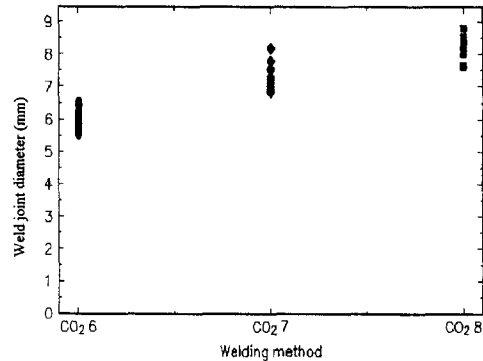


Fig. 10 The relationship between nugget diameter and welding method for CO<sub>2</sub> plugwelded specimen.

장수명영역에서는 회전각 자체가 작아서 이러한 효과가 거의 영향을 미치지 못하므로 피로수명의 차이가 작아지는 것으로 판단된다. CO<sub>2</sub> 플러그용접에서는 전체적으로 구멍의 크기 증가에 따라 피로수명이 증가하는 경향이 나타난다. 이는 구멍이 클수록 용착부의 직경이 증가하여 응력 부담부의 크기가 커지게 되므로 상대적으로 적은 응력을 부담하므로 피로수명이 길어지게 된다. 구멍의 크기가 클수록 용착부의 직경이 커지는 것은, 두 판재를 접합하기 위하여 구멍을 채워야 하는 용입량이 달라서 접합부의 크기가 커지기 때문이다. 즉, CO<sub>2</sub> 8의 경우가 CO<sub>2</sub> 6에 비하여 용입량이 많고 또 용접에 소모되는 시간도 길다.

CO<sub>2</sub> 6의 경우가 점용접의 경우와 가장 비슷한 피로수명을 가지며 이때 점용접부의 너트의 크기와 용착부 크기가 비슷함이 조사되었다. 이는 용착부의 크기가 다른 인자에 비해 피로강도에 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

CO<sub>2</sub> 6, CO<sub>2</sub> 7, CO<sub>2</sub> 8의 각각에 대한 용착부 측정결과를 Fig. 10에 제시하였으며, 뚫는 구멍의 크

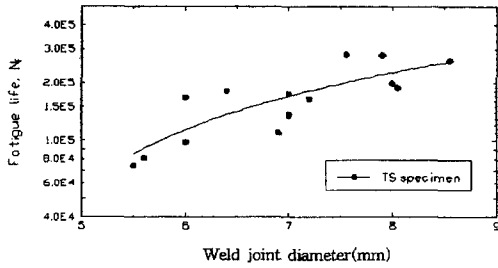


Fig. 11 The relationship between fatigue life( $N_f$ ) and nugget diameter for TS CO<sub>2</sub> plug welded specimens.

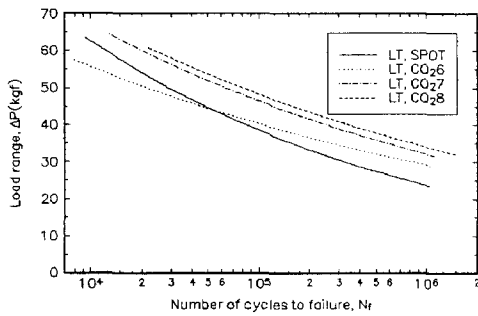


Fig. 12 The relationship between load range ( $\Delta P$ ) and number of cycles( $N_f$ ) for LT specimens.

기에 따라 용착부의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이를 토대로 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우 용착부의 크기와 피로수명과의 관계를 Fig. 11에 제시하였다. 이 그림은 250 kgf의 하중범위에서 피로시험을 행한 결과로 용착부 직경이 커짐에 따라 피로수명이 증가하는 경향이고 하중의 크기에 관계없이 같은 비율로 증대하고 있음이 조사되었다.

점용접 시험편은 하중축에 대하여 대칭구조이므로 앞면과 뒷면의 양끝단에 응력이 집중하게 되고 균열이 발생하는데 양쪽 중 먼저 균열이 발생한 주균열(main crack)과 대칭된 부위의 부균열(sub crack)의 발생시기가 비슷하다. 그리고 균열의 발생위치는 하중의 크기에 따라 달라지는데 저하중, 장수명의 경우는 너깃단 근처에서 발생하며, 고하중 단수명쪽으로 갈수록 모재쪽에 치우쳐 균열이 발생한다.<sup>(10)</sup> CO<sub>2</sub> 플러그용접부의 주균열은 하부판재의 용착부에 발생하며, 점용접의 경우와는 달리 하중의 크기에 따라 유동적이지 않다. 그리고 하중축 방향으로 대칭구조가 아니므로 하부판재의 용착부 끝단의 균열이 용착부의 크기 정도로 성장한 순간에도 전면 비드부의 균열이 외부표면까지 나오는



(a) Gap of plates



(b) Lack of fusion

Fig. 13 Magnified photograph of welding defects near the nugget ( $\times 50$ ).

것이 관찰되지 않는 경우가 대부분이다. 이는 비드에 의해 두께가 두껍고 강성이 커진 보강부(reinforcement)에 의해 균열의 발생이 억제되기 때문으로 판단된다.

### 3.3.2 L형 인장 시험편에 대한 피로시험

L형 인장 시험편에 대한 피로시험 결과를 종합하여 Fig. 12에 나타내었다. CO<sub>2</sub> 6과 점용접 시험편의 피로시험 결과를 비교해 보면 고하중의 경우는 점용접이 우수한 반면 저하중의 경우는 CO<sub>2</sub> 6의 경우가 더 나은 피로강도를 나타내고 있다. 저하중범위에서 CO<sub>2</sub> 6의 경우가 우수한 피로강도를 나타내는 것은 저하중하에서 점용접 이음에 비해 변형이 작고, 이로 인한 용접부 끝단의 응력집중이 작기 때문이다. CO<sub>2</sub> 플러그용접은 열영향부가 넓어서 점용접보다 더 넓은 범위에 걸쳐서 경화되어 있고 이로인한 보강부가 존재함으로써 전체적으로 강성(stiffness)이 커져 저하중하에서 점용접 이음에 비해 변형이 작고, 이로 인한 용접부단의 응력집중이 작기 때문인 결과로 추측된다. 이와 반대로 반복하중에 의한 굽힘변형을 받는 고하중범위에서는, 점용접 시험편은 양쪽의 너깃 끝단부 근처에서 비슷한 정도의 굽힘변형이 발생한 후 균열이 발생하여 진전하나 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 경우에는 하부

판재의 용착부 끝단에만 굽힘변형이 집중되어 파괴의 시작점이 된다. 그리고 상부판재에서는 보강부에 의해 변형이 억제되었으며, 사실상 피로시험이 진행되는 동안 하부판재의 용착부 끝단에 국부적인 변형이 집중되는 것을 관찰할 수 있었다. 즉 표면상태가 취약한 열영향부와 용착부와의 경계부에 국부 반복변형이 집중되는 것으로 판단된다. 이러한 이유로 고하중 단수명영역에서는 점용접이 유리한 것으로 판단되는데 이것은 인장전단(TS)시험편의 결과와는 상반된 결과를 나타내고 있다.

#### 3.4 CO<sub>2</sub> 플러그용접부의 피로수명에 미치는 영향

본 연구에서 CO<sub>2</sub> 플러그용접부의 품질에 영향을 미치는 인자로서, 외견상으로 식별할 수 있는 경우를 제외하고, 두 가지의 불량원인을 발견하였다. 이 두가지, 즉 용융부족(lack of fusion)과 두 판재사이의 틈새간격이 크게 나타난 경우를 Fig. 13에 제시하였다. 특히 두 판재사이의 틈새는 실제 현장에서 용접할 때 간격이 뜨지 않도록 압착하기가 힘든 관계로 반자동 CO<sub>2</sub> 플러그용접을 수행할 때 불가피하게 나타나는 경우가 대부분이다.

### 4. 결 론

점용접과 CO<sub>2</sub> 플러그용접의 방법으로 인장전단 시험편(TS)과 L형 인장 시험편(LT)을 제작하여 피로시험, 인장시험, 조직관찰 등을 행하였으며 이를 통하여 용접부의 강도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CO<sub>2</sub> 플러그용접의 인장전단 시험편에서 인장강도와 피로수명에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 용착부 직경이다.

(2) 인장시험 결과와 피로시험 결과를 통하여 용접부위의 강도를 평가한 결과, 인장에서는 점용접 시험편이 CO<sub>2</sub> 6의 경우보다 우수한 인장강도를 나타내는 반면, 장수명영역에서의 피로수명은 인장전단형의 경우는 유사하고, L형 인장 시험편은 낮은 경향을 보였다.

(3) CO<sub>2</sub> 플러그용접부는 점용접부에 비해 경도

가 높고 열영향부도 훨씬 넓게 분포하며, 보강부의 존재로 인해 전체적인 강성이 커졌다. 이것은 L형 인장 시험편에서 장수명영역의 피로강도를 증가시켰다.

(4) CO<sub>2</sub> 플러그용접부의 특성이 점용접과 상이한 것은 버드부에 비대칭의 보강부가 형성 되었기 때문이다.

(5) 인장전단형 시험편에 비해 L형 인장 시험편은 매우 낮은 피로강도를 나타내며 하중범위의 변화에 대하여 민감하게 피로수명이 변화하였다.

### 참고문헌

- (1) 須藤正俊 외, 1982, “高强度薄板のスポット溶接性,” 鐵と鋼 68年 第9号.
- (2) 이강용, 1989, “점용접의 연구동향,” 自動車工學會誌, 제11권, 제2호, pp. 13~17.
- (3) Orts, D. H., 1981, “Fatigue Strength of Spot Welded Joints in a HSLA Steel,” SAE 810355.
- (4) Sawhill, J. M., and Baker, Jr., J. C., 1980, “Spot Weldability of High-Strength Sheet Steels,” Welding Journal.
- (5) 小野英彦 외, 1982, “鋼のCO<sub>2</sub>아크スポット溶接 (第1報),” 溶接學會誌, 第51卷, 第7号, pp. 604~609.
- (6) 英國溶接學會, “自動 炭酸가스 溶接,” 1984.
- (7) Wilson, R. B. and Fine, T. E., 1981, “Fatigue Behavior of Spot Welded High Strength Steel Joints,” SAE 810354.
- (8) McMahon, J. C. et al., 1990, “Fatigue Crack Initiation and Growth In Tensile-Shear Spot Weldments,” Fatigue and Fracture Testing of Weldments, ASTM STP 1058, pp. 47~77.
- (9) Davidson, J. A. and Imhof, E. J., Jr. 1984, “The Effect of Tensile Strength on the Fatigue Life of Spot Welded Sheet Steels,” SAE 840110.
- (10) 강성수, 1990, “異種金屬接材의 疲勞舉動에 관한 기초적 연구,” 박사학위논문.