

레이저 점 용접의 응용

양 영 수*, 정 일*, 서 정**, 한 유 회**

Application of Laser Spot Welding

Y. S. Yang*, I. Chung*, J. Seo**, Y. H. Han**

ABSTRACT

Laser spot welding offers a unique combination of high speed, precision and low heat distortion, compared with conventional resistance spot welding. This combination of advantages is especially attractive for the automotive industry.

Until now automobile fabrication is widely used resistance spot welding, however, because of geometric and structural problem, spot welding is required many welding machine in that reason by substituting spot welding with laser welding, it save the equipment cost.

In the present study we measured ultimate strength and observed bead cross section of laser welded specimen and compared with that of the resistance spot welding results in order to adapt laser welding in automobile industry. Also for strength estimation we calculated the residual stress of laser welded zone. All calculations are performed with the ABAQUS code on a workststion.

Key Words : Laser spot welding (레이저 점 용접), Resistance spot welding(저항 점 용접), Finite element method (유한요소법)

1. 서론

고밀도 에너지를 전달하는 레이저 빔은 비교적 최근에 개발된 재료가공 수단으로 좁은 면적에 농축된 열에너지를 전달하는 특성을 갖기 때문에 산소-아세틸렌 열원이나 전기 아크 열원등과 비교할 때 가공부의 제한된 부분에만 열영향을 끼치면서 용접, 절단, 드릴링, 표면처리등 여러 생산공정에서 효과적으로 이용될 수 있다. 특히 최근에 수Kw급의 대용량의 레이저가 출현하면서 레이저 용

접의 중요성이 부각되기 시작했다. 레이저 용접은 용접 속도가 다른 어떤 용접법 보다 빠르고 용입깊이가 깊고 입열량이 적기 때문에 열에 의한 변형이 적고 열영향부가 매우 좁다는 등의 많은 장점을 가지고 있기 때문에 산업체에서 많이 사용되고 있으므로 이에 대한 연구를 필요로 한다.⁽¹⁻²⁾

자동차 body 생산공정을 레이저 용접을 이용하고자 이에 대한 검토의 일환으로 연구가 진행되었다.⁽³⁻⁴⁾ 현재 자동차 body는 대부분 저항점 용접에 의해 조립되고 있는

* 전남대학교 기계공학과

** 한국기계연구원 레이저가공 연구그룹

실정이다. 그러나 저항용접기의 구조적, 기하학적 특성으로 인해 그 적용 범위가 제한되고 용접 자체의 문제로 인해 많은 수의 용접기를 설치해야만 하는 등의 많은 문제점을 내포하고 있다.⁽⁵⁾ 따라서 이를 레이저 용접으로 대체하면 시설 투자비를 상당량 절약할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 레이저 용접과 저항 점 용접의 강도를 비교하여 자동차 body에 레이저 용접을 사용할 때 문제점을 검토하였다. 강도 검토를 위하여 레이저 용접시 용접부의 잔류응력을 계산하였으며 인장-전단시험으로 저항 점 용접과 비교하였다.

용접부의 잔류응력은 피로강도의 저하, 용접후 가공시 변형 등 용접부 강도에 영향을 미치는 주요한 인자중의 하나이다. 지금까지의 용접부 잔류응력에 관한 연구는 주로 아크 용접에 국한되어 연구가 이루어졌고, 레이저 용접부의 잔류응력에 관한 연구는 미미한 실정이다. 본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 레이저 용접시 열유동 및 열응력을 시간 변화에 따라 계산하여 최후에 잔류 응력을 계산하였다. 수치 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS package를 사용하여 계산하였다.

2. 실험

2-1 레이저 용접 실험

용접부 강도 비교를 위하여 레이저 용접과 저항 점 용접을 수행하였다. 시편재료는 연강을 사용하였으며 재료의 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 시편의 크기는 인장-전단 실험을 고려하여 가로 140mm, 세로 70mm, 두께 1mm 판을 겹치기 용접 하였다. 시편의 형상은 Fig.1과 같다. 용접은 시편의 겹쳐진 부분의 중앙점에 행하여졌으며 용접을 한후 용접 시편을 절단, 마운팅, 폴리싱, 에칭과정을 거쳐 조직을 관찰, 촬영하고 경도, 인장-전단실험을 실시하였다.

레이저 용접은 3kw급 연속 출력과 CO₂ 레이저를 이용하였으며 실험장치는 Fig.2와 같이 속도의 조절이 가능한 회전판 위에 시편을 올려놓고 회전하면서 용접이 가능

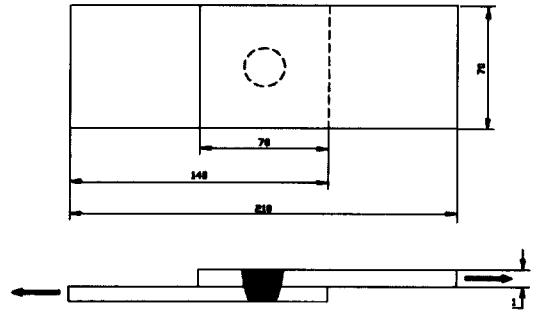


Fig.1 Configuration of specimen

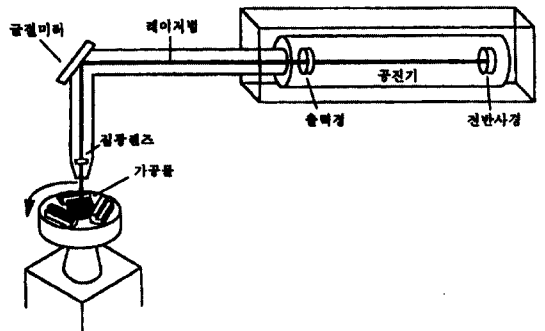


Fig.2 Schematic diagram of laser machining system

하도록 하였다. 레이저 출력 2kw, 보호가스 Ar 30 l/min, 초점거리 -0.5mm로 실험을 행하였다. 각 용접에 대한 회전 반경이나 용접 속도, 용접 시간 등은 Table 2와 같다. 각 조건에 대해 3개의 시편을 제작하여 단면관찰과 인장-전단실험에 사용하였다.

시편의 미세조직 관찰은 polishing후 5%의 nital용액으로 5-7초 정도 부식시킨 후에 금속 현미경을 이용하여 200배 확대시킨 후 사진 촬영하였다. 경도값은 micro-vickers 경도계로 측정하였으며 단면을 관찰한 시편을 이용, 측정하중은 100g을 사용하여 용접비드를 중심으로 횡단면의 경도를 측정하였다. 측정은 용융부 중심으로부터 모재 방향으로 0.2mm간격으로 행하였다. 인장-전단 실험은 최대 5톤 하중의 인장시험기를 이용하여 행하여

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of specimen

C	Mn	P	Yield strength	Tensile strength
0.018%	0.16%	0.015%	25kg/mm ²	32kg/mm ²

Table 2. Laser welding condition of each specimen

specimen	rotation radius(mm)	rotation rpm	welding velocity (m/min)	welding time(sec)
A	0	0	0.00	1.0
B	2	60	0.75	1.0
C	3	60	1.13	1.0
D	4	60	1.51	1.0
E	5	60	1.88	1.0

졌으며 두 시편이 완전히 분리되었을 때의 값을 파괴 값으로 측정하였다.

2-2. 저항 점 용접 실험

레이저 용접과의 강도비교를 위하여 저항 점 용접을 행하였다. 시편은 레이저 용접과 같은 조성과 형상을 가지고 있으며 저항 점 용접을 행한 후 레이저 용접과 마찬가지로 시편을 절단하여 폴리싱과정 등을 거쳐 용융부의 크기를 측정한 후 레이저 용접 시편과 동일한 조건에서 인장-전단 실험을 실시하였다. 용접조건은 전류 11kA, 용접시간 15cycle, 가압력 320kgf, 전극봉의 직경은 6.5mm로 실험을 행하였다.

3. 레이저 용접부의 잔류응력 계산

잔류응력은 재료의 취성과 파괴 발생과 피로강도 감소에 상당히 큰 영향을 주고 또한 응력부식에 의해 재료의 부식을 촉진시키는 원인이 되기도 한다. 이와 같이 잔류응력은 재료의 파괴에 지대한 영향을 미치므로 정확한 잔류응력의 크기와 그 분포상황을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 금속은 가열하면 팽창을 하게되며 냉각하면 수축하는 성질이 있다. 만일 물체 전체가 균일하게 가열되고 균일하게 냉각되면 팽창과 수축도 일정하게 일어나므로 물체는 잔류응력이 존재하지 않게 되지만 실제 용접 작업에서는 국부적인 가열에 의해서 불균일한 온도분포를 갖게되어 모재에 열응력이 발생하게 된다. 모재는 온도가 상승함에 따라 항복응력이 저하하기 때문에 발생한 열응력은 항복응력을 초과하여 소성변형을 일으키고 냉각 수축후 재료 내부에 잔류응력을 생성시킨다.⁽⁶⁾ 그러므로 해석은 열탄소성 문제를 시간에 따라 변하는 비정상상태의 문제를 풀어야 한다. 열응력의 생성원인은 가공물내 온도의 불균일한 분포에 의해 발생하기 때문에 잔류응력 및 변형해석을 위한 선형단계로서 열유동 해석이 이루어져야 한다.

3-1. 유한요소모델링

해석을 위한 유한요소 프로그램은 software package ABAQUS를 사용하여⁽⁷⁾ 용접부의 열유동 및 잔류응력을 계산하였다. 재료의 열적 기계적 성질은 온도변화에 따라 고려하였으며 축대칭으로 생각하여 Fig.3과 같이 원통좌표 $(r - \theta - z)$ 를 사용하였다. Fig.4는 유한요소 해석에 사용한 Mesh를 보여주고 있다. 모델은 2차원이며 사용한

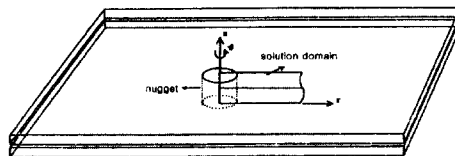


Fig.3 Schematic diagram of solution domain and coordinate system



Fig.4 Axial-symmetric finite element mesh(2-dimension)

요소는 사각형 4절점요소이고 용융부에서는 요소내의 온도가 급격하게 변하기 때문에 Mesh를 더 작게 나누었으며 열원으로부터 멀어질수록 요소를 크게 하였다. 사용한 총 요소 수는 620개이고 절점수는 727개이다.

용접후 인장-전단 실험을 해석하기 위하여 3차원 해석을 하였다. Fig.5는 실제 레이저 용접 이음체에 대응하는 3차원 모델의 요소분할을 나타낸 것이다. 요소는 8node solid와 6node solid 요소로서 절점수 689, 요소의 수 480 개이다. 두께 1mm의 상,하 평판 모두 똑 같은 갯수의 요소로 각각 독립적으로 분할되어 있으나 nugget부분은 하부평판의 nugget부분 윗쪽 표면의 요소절점을 상부평판의 nugget부분 아래쪽표면의 요소절점과 동일시함으로써 두께 2mm의 단일 요소로 분할하여 상,하평판을 일체화하였다. 이때 nugget부분의 형상은 실제 시편 $A(r=0)$ 인 조건의 실험결과를 토대로 모델링 하였다. 판간의 간극은 0.01mm로 하였고 이때 좌표축은 직교좌표

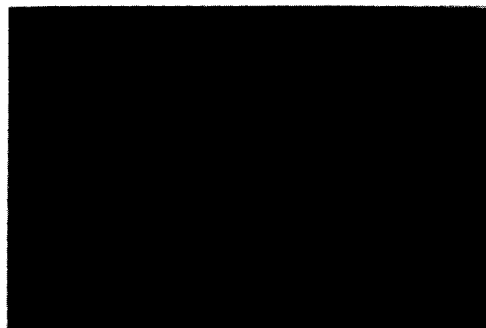


Fig.5 Finite element mesh (3-Dimension)

(x-y-z) 를 사용하였다.

열원은 flux의 형태로 표면과 keyhole벽면으로 입열 된다고 가정하였으며 온도 분포 해석에 있어서 필요한 재료의 열적 물성치인 열전도도, 비열, 밀도는 온도 변화에 따라 고려하였다. 또한 용융시 발생한 잠열도 고려하였다.⁽⁸⁾

열전달 해석에 의해 온도 분포를 구한 후 이 데이터를 이용하여 열응력을 시간변화에 따라 시편이 상온으로 냉각시 까지 계산하여 잔류응력 값을 구하였다. 경계조건은 온도분포 해석과 응력해석의 상태에 대해 주어야 하는데 그 중 열전달의 경계조건은 대기와 접촉하고 있는 부분은 자연대류로 처리하였으며 응력해석시의 경계조건은 Fig.4와 같다. 즉 r=0에서 r방향을 구속하였고 r=35mm, z=0인 점에서 z방향을 구속하여 rigid body motion을 구속하였다.

4. 결과 및 고찰

레이저 점 용접에서 용접부의 형상 즉 용접깊이나 용접 단면형상 등에 영향을 미치는 주요한 인자로는 레이저의 출력, 초점반경, 용접속도, 초점위치, 재료의 물리적 특성을 생각 할 수 있다. 레이저 점 용접과 저항 점 용접의 각 조건들에 의한 실험결과는 Table3, 4에 나타나 있다. Fig.6은 용접후 비이드의 외관을 촬영한 것으로 F는 시편의 앞면, B는 뒷면을 표시한 것이다. 시편들의 용접비이드를 관찰해보면 회전 반경이 작은 시편 A와 B는 양호한 형상을 나타내고 있으나 시편 C의 앞면을 보면 용접이 끝나는 위치에 약간의 기공이 나타나고 있다. 시편D에서는 앞면 비이드의 기공이 조금 더 크게 나타나고 있으며 시편 E에서는 커다란 크레이터를 형성함을 볼 수 있었다. 이것은 회전 반경이 커짐에 따라 앞면 비이드의 형상이 불량해진다는 것을 나타내고 있다. 즉 각 시험조건에 대해 회전판의 속도는 60rpm으로 일정하기 때문에 레이저

빔의 회전반경이 커짐에 따라 용접 속도가 빨라지게 되고 이 값이 어느 임계값 이상 증가하게 되면 충분한 열전도가 이루어지지 못하게 되어 비이드의 형상이 불량해진다고 하겠다. 아래면 비이드의 형상은 모든 조건하에서 양호하였다. Fig.7은 각 그림에서 상부에 위치한 그림은 용접후 시편을 절단하여 그 시편의 단면을 polishing한 후 부식시킨 모습을 촬영한 것이며 하부의 그림은 용접된 시편의 한쪽 판을 완전히 제거한 후 polishing후 부식시켜 용융부의 형태를 관찰한 것이다. 사진에서 용접부는 용융부와 열영향부의 구분이 곤란하나 실제 시편을 현미경에서 관찰하면 구분이 가능하다. 사진에서 용접부는 열영향부를 포함하고 있다. 용접부 단면사진에서 용융부의 크기

Table 3. Tensile-shear tested results of laser welded specimen

specimen	fracture strength(kg)	joining (nugget)area (mm ²)	joining diameter (mm)
A	792	32.2	6.4
B	792	32.2	6.4
C	909	-	7.5
D	1006	-	9.1
E	1070	-	11.0

Table 4. Tensile-shear tested results of resistance spot welded specimen

specimen	fracture load (kg)	maximum joining diameter (mm)
F	830	7.5

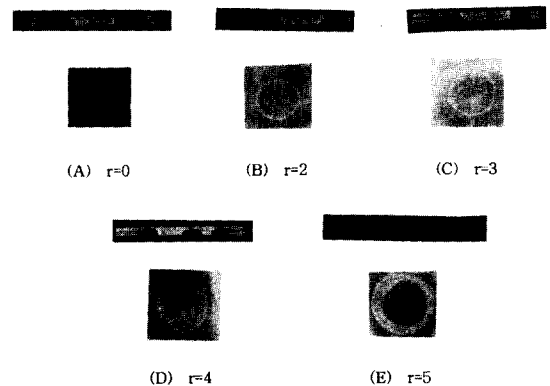


Fig.7 Cross section of welded zone

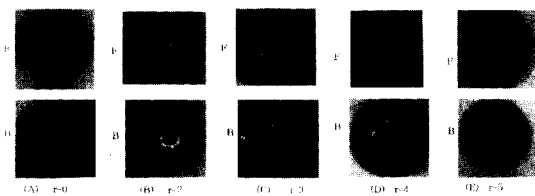


Fig.6 Shape of weld bead (F=front, B=back)

와 형태를 알 수 있다. A와 B는 nugget내부가 모두 용융이 일어났음을 알 수 있다. C와 D는 회전반경이 커짐에 따라 nugget의 외곽쪽은 완전 용입이 일어남을 볼 수 있었지만 nugget의 내부에서는 용융이 일어나지 않았다. E에서는 회전반경이 더커짐에 따라 용접 속도가 매우 빨라지기 때문에 완전한 용입이 일어나지 않음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 위에서 관찰한 비이드의 형상에서와 마찬가지로 용접속도가 용접 깊이나 단면형상에 큰 영향을 미쳤다는 것을 알 수 있다. 시편A와 B에서 용융부 외곽에 하얀 색을 띤 부분이 열영향부이고 내부는 용융부이다. 이 두 시편은 nugget 내부가 모두 용융이 일어났으므로 접합부의 면적은 원형으로 생각하여 쉽게 계산할 수 있었다. 즉 단면을 관찰한 시편을 이용하여 용융부의 직경을 측정하고 그 직경을 이용하여 접합면적을 구할 수 있었다. 이때 정확한 용융부의 직경을 구하기 위해서 현미경을 이용하여 길이를 측정하였다. 한편 시편 C, D, E는 nugget내부가 용융이 일어나지 않았을 뿐 아니라 열전도의 영향에 의해서 용융부가 확대칭을 이루지 못하고 있다.

Fig.8의 경도값에서 레이저 용접부의 경도가 크게 상승하지 않았음을 볼 수 있다. 이것은 Fig.9의 미세조직과 관련하여 생각하면, 용접부에 1초동안 열을 가하였기 때문에 두께와 관련하여 생각하면 용접부에서 큰 냉각 속도를 갖는 급냉이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. Fig.9의 상부의 용융부의 미세조직 사진을 보더라도 마르텐사이트가 형성되지 않았음을 볼 수 있다. 시편의 인장-전단 시험결과를 Fig.10에 나타난 것과 같이 용접부에서 파단이 일어난 것이 아니고 용접부 주위에서 파단이 일어나고 있다. 시편은 파단하중에 도달하면 소성영역이 거의 나타

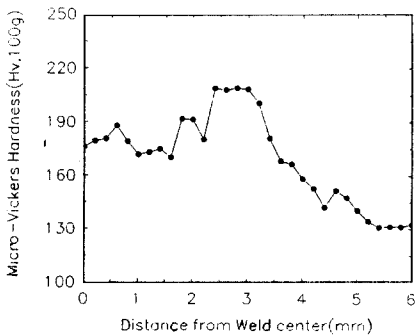


Fig.8 Micro-Vickers hardness (specimen(A))

나지 않고 파단이 진전되었다. Table3과 같이 파단하중은 접합부의 면적보다는 nugget의 직경과 관련됨을 알 수 있었다. 비록 nugget의 내부가 용융이 일어나지 않았더라도 용융부가 아니 모재에서 파단이 일어나고 있으므로 접합부의 면적보다는 접합부의 직경에 의해서 파단하중이 결정된다. 이것은 접합부의 직경이 커짐에 따라 nugget의 곡률반경이 커지게 되고 따라서 nugget 주위

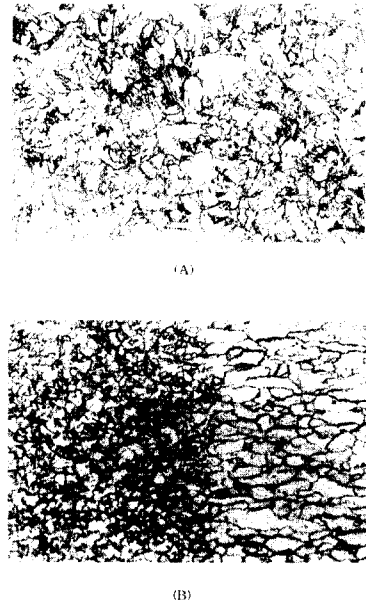


Fig.9 Micrograph of bead cross section (A)Fusion Zone (B) HAZ and Basemetal

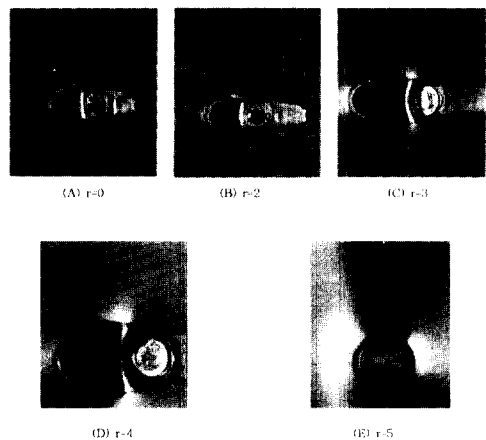


Fig.10 Fractograph of tensile-shear tested specimen

의 응력 집중이 감소 함에 따라 강도값이 증가한다고 할 수 있겠다. Fig.11-12의 저항 점 용접에서도 동일한 형상의 파단이 일어나고 있다. 동일한 nugget직경(7.5mm)에 대해서도 저항 점 용접에 비하여 레이저 점 용접의 강도가 크게 나타나고 있다. 이것은 저항 점 용접의 경우 nugget주위에서 변형이 심하게 나타나므로 파단이 쉽게 일어나기 때문이다. 그러므로 인장-전단 시험을 이용한 강도 평가는 자동차 body에 지금까지 이용해온 저항 점 용접 대신 레이저 점 용접을 사용하여도 큰 문제가 없을 것으로 생각된다. 그러나 정확한 강도평가를 위해서는 nugget부분에서 파단이 일어나는 실험법을 선정해야 할 것으로 생각된다. 즉 피로 시험을 수행하여 강도를 측정함으로써 저항 점 용접 대신 레이저 점 용접을 사용하여도 문제가 없음을 확신 할 수 있을 것으로 사료되어 이에 대한 연구는 계속 진행 중에 있다.

용접부 강도 평가에는 잔류응력이 중요한 역할을 하기 때문에 레이저 점 용접의 경우 잔류응력 분포를 예측하기 위하여 수치해석을 실행하였다. 위의 실험결과로 수치 해

석을 위한 조건은 시편A를 선정하였고 레이저 점 용접부의 축대칭 2차원 유한요소 해석 결과 온도분포는 Fig.13-17에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시간변화에 따라 용융부의 형상이 점차 성장하고 있음을 보여준다. 1초까지는 가열과정이고 이후에는 냉각과정이다.



Fig.13 Temperature distribution in solution domain (0.02 sec)

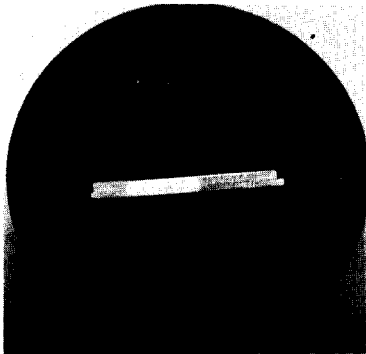


Fig.11 Cross section of welded zone (specimen(F))

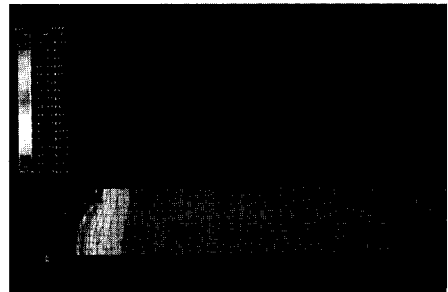


Fig.14 Temperature distribution in solution domain (0.04 sec)



Fig.12 Fractograph of tensile-shear tested specimen(specimen(F))

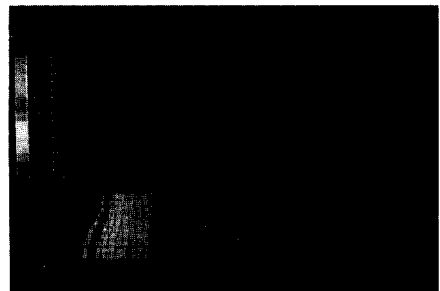


Fig.15 Temperature distribution in solution domain (0.1 sec)

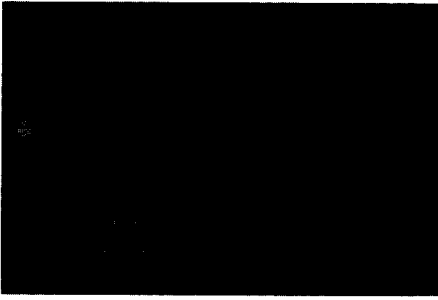


Fig.16 Temperature distribution in solution domain (0.2sec)

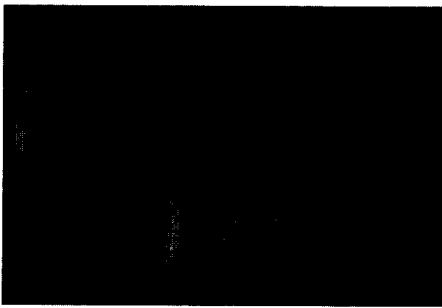


Fig.17 Temperature distribution in solution domain (1.0sec)

Fig.18-21은 용접부 주위에서 잔류응력의 분포를 나타낸 값으로 용접시 잔류응력의 크기와 분포형태를 알 수 있다. 원주방향이나 반경방향의 잔류응력은 거의 nugget 반경의 3-4배 길이 정도까지 상당히 큰 인장 잔류응력이 분포되어 있음을 볼 수 있다. Fig.22-25은 3차원 해석시 접합면에서 잔류응력 분포를 나타낸 것으로 여기에서도 역시 2차원 해석 결과와 마찬가지로 용접부 주위에서는 x, y방향으로 큰 인장잔류응력이 분포되어 있음을 알 수

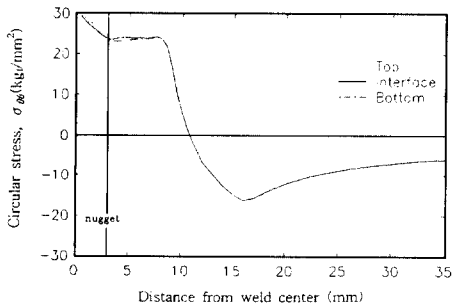


Fig.18 Residual stress of circular direction (result of 2-dimensional analysis)

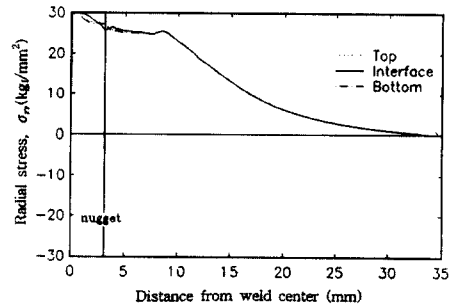


Fig.19 Residual stress of radial direction (result of 2-dimensional analysis)

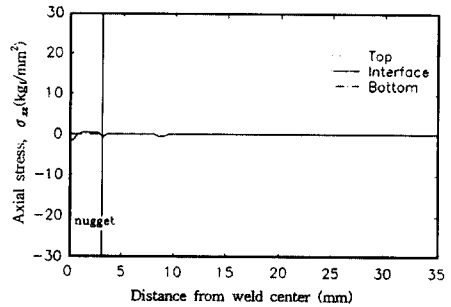


Fig.20 Residual stress of axial direction (result of 2-dimensional analysis)

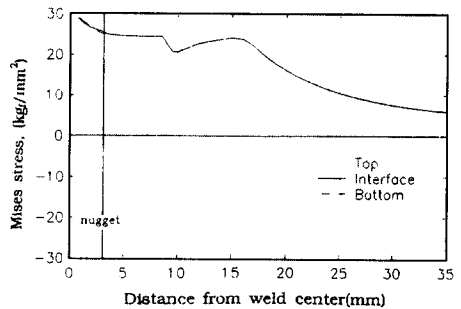


Fig.21 Residual stress of Mises (result of 2-dimensional analysis)

있다. 이것은 Fig.18-21의 원통 좌표를 직교 좌표로 나타낸 결과로 생각하면 된다.

Fig.26는 용접후 인장-전단 시험시 x방향의 응력을 나타낸 것으로서 nugget의 위치에서 보다 nugget 주위에서 응력이 크게 작용되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 Fig.27에서 같이 시편의 끝단에 하중을 가하였을 때 변

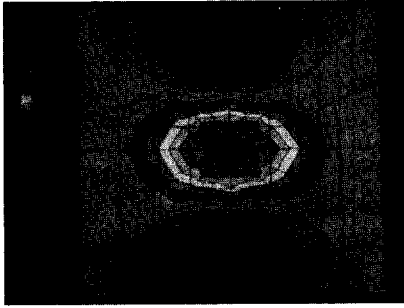


Fig.22 Residual stress of X direction (result of 3-dimensional analysis)

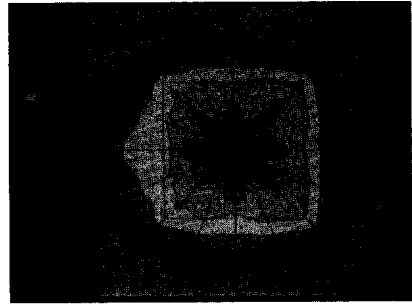


Fig.25 Residual stress of Mises (result of 3-dimensional analysis)

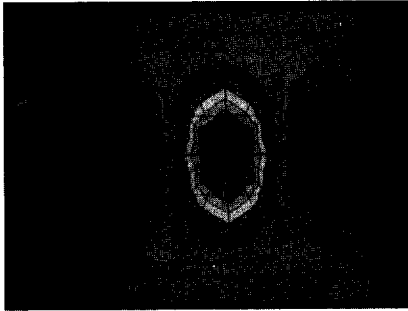


Fig.23 Residual stress of Y direction (result of 3-dimensional analysis)

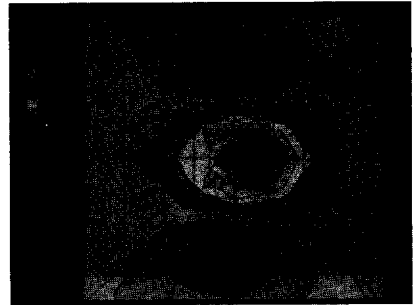


Fig.26 Stress distribution of X direction at tensile-shear test

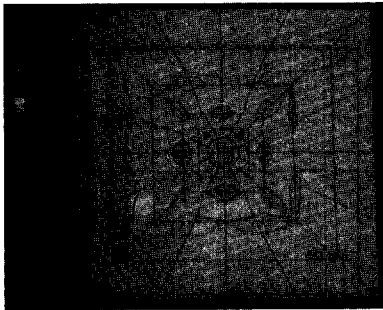


Fig.24 Residual stress of Z direction (result of 3-dimensional analysis)

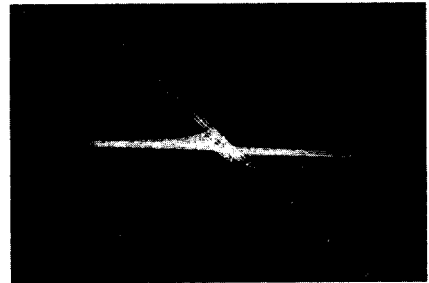


Fig.27 Shape of deformation due to tensile-shear loading

형태를 보면 이해할 수 있다. 위의 결과로 미루어보아 인장-전단 시험시 파단 부위가 용접부가 아닌 주위의 모재에서 일어남을 알 수 있다.

5. 결론

자동차 body용접시 현재까지는 저항 점 용접이 거의 이용되고 있는데 이를 레이저 점 용접으로 대체하고자 하

는 목적에서 연구가 진행되었다. 레이저 점 용접으로 대체 되었을 때의 신뢰성 평가의 기준으로서 두 용접간에 강도를 비교하였고 또한 레이저 용접부의 강도 검토를 위하여 잔류응력을 계산하였다. 강도 비교를 위한 인장-전단 시험결과 레이저 점 용접과 저항 점 용접에 의한 시편의 강도는 큰차이가 없음을 알았다. 즉 현재까지 저항 점 용접물이 강도에서는 문제가 발생하지 않고 있기 때문에 저항 점 용접을 레이저 점 용접으로 대체하여도 강도 측면

에서는 아무런 문제가 없을 것으로 판단되나 파단부위가 용접부가 아닌 모재에서 일어나고 있으므로 추후 nugget에 파단이 예상되는 피로시험을 필요로 한다.

용융부의 형상과 관계된 레이저 점 용접의 최적의 조건을 구해보면 회전반경이 커짐에 따라 비이드 윗면에서 크레이터 형상의 구멍이 생기고 있음을 알 수 있다. 레이저 빔의 회전 반경이 3mm 이상인 경우에는 nugget내부가 완전히 용융되지 못하고 용융부도 축대칭을 이루지 못하고 있다. 그러므로 비록 회전 반경이 증가함에 따라 강도는 증가하고 있지만 회전 반경이 3mm 이하인 경우도 역시 저항 점 용접에 비하여 강도가 우수하기 때문에 가능한 회전반경을 적게 하거나 회전을 하지 않고 레이저 점 용접으로 용접을 실시하는 것이 유리할 것으로 생각된다.

잔류응력분포는 FEM 해석 결과 nugget직경의 약3배 정도 까지 큰 인장 잔류응력이 존재함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J. K. Baysore, M. S. Williams, "Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks" *welding journal*, pp 345s-351s, Mar.1992.
2. P Lazzrin, E Rabino, "Fatigue behavior of laser and resistance seam welds in the automotive industry", *welding international*, pp 19-25, Sep.1995.
3. P. C. Wang AND K. M. Ewing, "A comparison of fatigue strength: Laser beam vs. resistance spot welds", *welding journal*, vol.70, pp 43-47, Oct.1991.
4. P. C. Wang, "Calculation of Laser Beam Welds pecification for Automotive sheet steel", *welding journal*, vol72, pp 155s-163s, Apr.1991.
5. H. Papkala "Technological problems in spot welding of galvanized car body sheet", *welding international*, pp 341-346, Jun.1992.
6. Koichi Masubuchi, "Analysis of welded structure" Pergamon, pp 328-335, 1980.
7. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, ABAQUS theory and user's manuals, Hibbit, Karlsson and Sorensen, inc, province, Rhode Island, 1987.
8. Metal Handbook, American Society for Metals Materials Park, Ohio, Vol.2, pp 195-199, 10th edition, 1990.