

자동차 차체제작용 레이저 용접 판재의 피로균열 전파 특성

The Characteristic of Fatigue Crack Propagation of Laser Welded Sheet Metal for Automobile Body Panel

곽대순*, 권윤기**, 오택열***, 이경엽***, 강연식****
Daisoon Kwak, Yunki Kwon, Taekyul Oh, Kyongyop Rhee, Yeonsick Kang

ABSTRACT

For the Tailor Welded Blank sheet used for automobile body panel, the characteristics of fatigue crack propagation behavior were studied. The thickness of specimen was machined to be same (0.9+0.9mm) and different (0.9+2.0mm). As a base test, mechanical properties around welding zone were examined. The results indicated that there were no significant decreases in mechanical properties, but hardness around welding bead is 2.3 times greater than base material. The crack propagation rate was noticeably decreased around welding line and rapidly increased as it passed by welding line. Reviewing the shape of the crack propagation, crack width around welding line was wide around the welding zone due to retardation of crack growth, but it became narrow passing welding line due to decreased toughness. Elasto-Plastic analysis was performed by finite element analysis for explaining the test results.

주요기술용어 : Fatigue behavior(피로거동), Laser weld(레이저 용접), Stress intensity factor(응력확대계수), Tailored blank(합체 박판)

Nomenclature

K_I : stress intensity factor, MPa $m^{1/2}$
a : crack length, mm
 σ : remote stress, MPa
w : width of specimen, mm

* 회원, 경희대학교 대학원
** 회원, 두원공대 컴퓨터응용설계과
*** 회원, 경희대 기계산업시스템공학부
**** 회원, 고등기술연구원

1. 서론

레이저 용접은 높은 에너지 밀도의 열을 이용하는 용접이기 때문에 기존의 용접법 처럼 용접 에너지를 재료에 전달함에 있어 표면을 기점으로 점진적인 열전달이 아니라 재료의 두께 방향으로 직접 투입하는 형식의 고속 용접법이다. 따라서 레이저용접은 다양한 분야에 적용되고 있으며, 70년대초 GM(General Motors)사가 생산라인에 처음으로 레이저를 도입한 이래로 자동차 분야에

서의 레이저의 응용은 비약적인 발전을 이루어 왔다. 현재 레이저 용접이 자동차 산업에 응용되는 형태로는 대략 차체용 강판용접, 부품용접, 그리고 최근 새롭게 각광 받고 있는 Tailored Blank 용접 등을 들 수 있다. 특히 Tailored Blank 용접은 자동차 차체 (Body Panel) 제조 공정에 있어서 둘 이상의 부품을 일체화하여 프레스 작업을 수행하기 위한 것으로 생산성 및 정밀도의 향상에 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다.¹⁾ 이 방법의 장점을 구체적으로 살펴보면, Tailored Blank 용접은 용접속도가 빠르고, 용입 깊이가 깊으며, 열에 의한 변형이 적고, 어떤 환경에서도 용접이 가능하므로 생산의 유연성이 매우 높다.²⁻⁵⁾ 그러나 이런 많은 장점에도 불구하고 Tailored Blank 용접은 해결해야 할 많은 문제들을 안고 있는데, 우선적으로 해결되어야 할 문제가 성형성과 구조적 안정성의 확보라 할 수 있다. 따라서 성형성의 확보를 위해서는 둘 이상의 소재를 레이저 용접에 의해 결합한 후 일체로 프레스 성형이 가능하게 하기 위한 용접 방법과 소성가공 방법이 복합적으로 이루어져 한다. 또한 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 둘 이상의 소재가 접합되어 있는 부분에서의 역학적 안정성 검토가 우선적으로 선행되어져야 한다고 판단된다. 현재 이 분야에 대한 연구들을 종합해 보면 성형성에 대한 연구가 주종을 이루고 있는데, 레이저 용접 조건에 따른 금속 조직의 변화나⁶⁾, 용접 조건에 따른 스트레인의 한계 그리고 접합되는 강판의 두께한계 등을 규명한 것⁷⁾, 레이저나 시임(seam), 전자 빔 등을 이용하여 Tailored Blank 용접을 수행함으로써 레이저를 이용한 Tailored Blank 용접의 우수성을 규명한 것¹⁾, 또한 이중의 얇은 판을 용접했을 때의 성형성을 고찰한 것,⁸⁾ 그리고 성형성을 극대화하기 위한 용접 조건중 판과 판 사이의 간격을 변수로 고찰한 것²⁾ 등 주로 성형성을 개선하기 위한 용접조건에 대한 연구가 주종을 이루고 있다고 할 수 있다. 성형성의 개선에 관한 연구가 매우 다양하게 진행되고 있는데 비해 구조 안정성에

관한 연구는 매우 부족한 실정이며, 현재 점 용접과 관련된 연구는 많이 진행되고 있으나⁹⁻¹¹⁾ 레이저 용접과 관련된 연구는 단순한 기계적 물성을 파악하는 수준에 머물러 있는 실정이다.¹²⁻¹³⁾ 그러나 향후 생산 현장에 레이저를 활용한 Tailored Blank 용접의 확대를 위해서는 실제 가공된 구조물이 사용되는 사용환경을 고려한 구조 안정성에 대한 검토가 무엇보다 시급하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 Tailored Blank 용접부의 구조 안정성을 고찰하기 위하여 접합 부위에서의 외부하중에 의한 피로 균열 전파 특성을 고찰하였다. 현재 자동차의 제작에 적용되고 있는 형태로 시험편을 제작하여 이중의 두께로 용접되었을 경우, 동일 두께로 용접되었을 경우 용접부에서의 피로 균열의 전파 특성을 고찰하였고, 균열선단에서의 탄소성 해석을 수행하여 레이저 용접부의 균열 발생에 대한 피로 안전성을 규명하였다.

2. 실험 및 실험 방법

2.1 시험편 제작 및 용접조건

본 연구에 사용된 시험편의 재질은 냉간 압연 강판재로 SPCEN(KS D 3512) 0.9mm 두께의 재료와 2.0mm 두께의 재료가 사용되었다. 사용된 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition

Material	C	Mn	Si	P	S
SPCEN	0.016	0.19	0.029	0.019	0.006

모재의 기계적 성질과 레이저 용접된 후 시험편의 기계적 성질은 Table 2와 같다. 모재의 경우 인장강도는 약 339MPa 이었고, 용접재의 경우는 약 374MPa로 레이저 용접을 행한 후 기계적 성질은 모재와 비교하여 약 10%의 인장강도가 증가 하였다.

Table 2 Mechanical properties of specimens

Specimen	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Base Metal	215.7	339.3	39
Laser Weld	261.3	374.2	25

* Loading direction was parallel to the weld line

Fig. 1은 피로균열 전파 거동을 고찰하기 위한 시험편으로 용접선의 방향이 하중방향과 평행하도록 제작하였고, 피로균열 발생의 재현성을 높이기 위하여 시험편 측면에서 와이어 커터를 사용하여 길이 13mm의 균열 (Pre-crack)을 생성하였다.

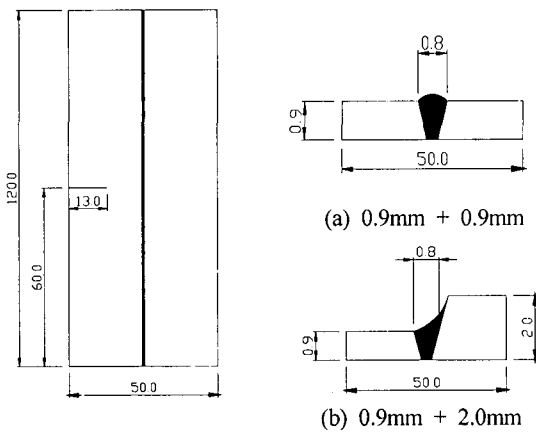


Fig. 1 Dimension of specimen for fatigue crack propagation test

한편 본 연구에 사용한 용접조건은 현재 자동차사에서 차체 제작에 사용되고 있는 용접조건을 사용하였는데, 레이저 용접된 시험편 Fig. 1 (a)는 0.9mm 강판을 4kW의 출력으로 6m/min의 속도로 맞대기 용접하였고 (b)는 0.9mm 강판과 2.0mm 강판을 5m/min의 속도로 맞대기 용접하였다. 레이저는 CO₂ 레이저를 사용하였고, 보조가스(assist gas)로는 헬륨(He) 가스를 사용하였다. Table 3에 용접조건을 나타냈으며, 이는 육

안검사와 비파괴 검사 결과 양호한 상태를 나타냈다.

Table 3 Welding condition

Material	Power (kW)	Speed (m/min)	Thickness (mm)
SPCEN	4	6	0.9+0.9
SPCEN	4	5	0.9+2.0

2.2 레이저 용접 비드의 물성 실험

용접 비드부의 정확한 기계적 물성을 얻기 위해서는 용접 비드부를 절단하여 직접 인장실험을 행하는 방법이 있으나 레이저 용접법은 타 용접법과 달리 매우 좁은 폭의 비드를 형성시키므로 비드부만을 정확하게 잘라내어 시험편을 제작하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 Table 3과 동일한 용접조건을 적용한 상태에서 반복적으로 비드부가 겹쳐지게 용접을 행하여 폭 5mm의 레이저 용접 비드를 형성시킨 다음 이를 절단하여 인장 실험을 실시하였다. Table 4는 인장 실험 결과 얻어진 레이저용접 비드부의 기계적 성질로 총 5개의 시험편을 시험한 평균값이다. 레이저 용접 비드부는 모재보다 약 1.4배 높은 항복강도를 나타내고 있다.

Table 4 Mechanical properties of laser weld bead

Specimen	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Weld Bead	309.9	379.2

2.3 피로균열 전파 실험

제작된 시험편은 실온에서 완전편진 인장하중 (응력비 R=0) 상태로 서보 유압식 피로시험기인 Instron 8501 실험기에 의해 실험되었다. 하중의 형태는 Sine 파형의 형태로 10Hz로 작용시켰다. 균열전파 거동을 명확히 관찰하기 위해 시험편의 양쪽 표면은 경면 연마하였고, 균열 길이 측정은

광학적 직접 측정법으로 광학배율 100X의 이동 현미경을 실험기에 부착하여 1/100mm까지 측정 가능한 접안 마이크로미터를 사용 ASTM E 647에 의거 측정하였다. 한편 용접부 주위의 금속학적 고찰과 파면에 대한 분석은 금속현미경을 사용하여 관찰하였다. 또한 용접부 주위의 기계적 물성의 변화를 고찰하기 위하여 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 용접부의 경도 변화를 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부 주위의 경도 및 조직변화

마이크로 비커스 경도계를 사용하여 300g의 하중으로 0.25mm 간격으로 측정한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 모재의 마이크로 비커스 경도는 평균 85였는데, 용접 비드 부분에서는 모재 보다 약 2.3배 가량 높은 192를 나타내었다. 그리고 일반용접 등에서는 명확히 나타나는 열 영향부가 레이저 용접시 경도측정에서는 거의 나타나지 않았다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 모재 부분에서는 일정한 경도값을 나타내다가 용접부분에서 급격한 경도값의 향상을 보이고 있다. 이것은 레이저 용접의 장점으로 열전도에 의존하여 용접이 행하여지지 않고 좁은 부분에 직접 열에너지를 가하는 레이저 용접의 특성을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

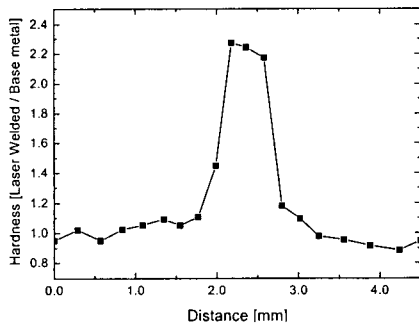


Fig. 2 Micro vicker's hardness

이와 같은 현상은 금속 현미경을 이용하여 금속 조직을 관찰한 결과에서도 잘 나타나고 있는데 Fig. 3, Fig. 4는 금속현미경을 이용한 용접부 주위의 금속 조직을 나타낸 것이다. Fig. 4는 용접부 표면의 형상으로 가운데 부분에 용접 비드의 형상이 나타나 있고, 이때 용접 비드 폭은 약 0.8mm 이다. 용접부 주위의 금속조직을 좀더 구체적으로 살펴보기 위해 고배율 금속현미경을 이용하여 모재 부분인 a 영역과, 열 영향부인 b, 용접 비드 부분인 c 영역에서의 금속 조직을 고찰하였다.

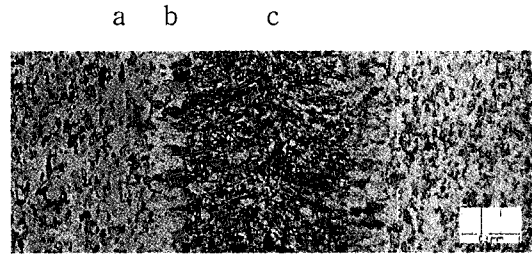
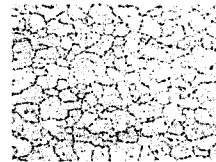
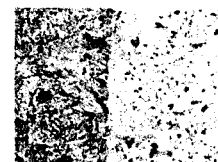


Fig. 3 The shape of weld surface



(a) Base metal



(b) Heat affected zone

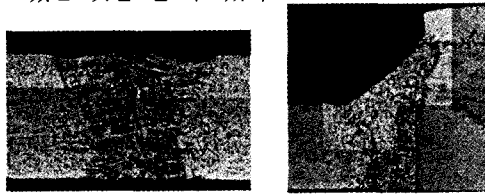


(c) Bead

Fig. 4 The micro-structures of weldment

Fig. 4는 용접부 주위의 금속조직 사진으로 모재 부분과 열 영향부, 그리고 비드 부분에서의 금속조직의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4의 (a)에서는 결정립과 결정립 경계 등 SPCEN의 일반적인 조직의 형태를 보이고 있는 반면, (c)의 용접

비드 부분에서는 결정립과 결정립 경계의 형상이 모두 붕괴된 형태로 나타나 있으며, (b)는 열 영향부를 나타내고 있는데, 모재부의 금속조직의 형상과 용접 비드의 금속조직의 형태가 뚜렷한 경계를 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 2의 경도 변화에 대한 결과에서도 잘 나타나고 있는 것으로, 일반 용접과는 달리 레이저용접은 많은 량의 에너지를 국부적인 위치에 가함으로서 열전달에 의한 열 영향부를 극소화 할 수 있다는 사실을 보여주는 결과라 판단된다. Fig. 5는 용접부의 단면 형상으로 같은 두께의 강판을 접합시켰을 때의 형상(a)과, 서로 다른 이종의 두께를 접합시켰을 때의 단면형상(b)을 보여준다. 중간 부분에 용접선의 형태가 뚜렷이 나타나 있고, (b)의 0.9mm와 2.0mm의 접합의 경우도 용접선의 형태가 불규칙하지 않고 연속적인 형태로 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.



(a) 0.9mm+0.9mm (b) 0.9mm+2.0mm

Fig. 5 The shape of welded cross section

3.2 용접부에서의 피로균열전파거동

3.2.1 두께변화를 고려한 응력 확대 계수 해석

용접부의 이종 두께 부분에서 균열의 성장거동을 고찰하기 위하여 유한요소해석을 수행하여 두께 변화에 대한 응력확대계수의 변화를 고찰하였다. 유한요소 해석은 상용 유한요소 해석 코드인 EMRC NISA와 피로/파괴 전용 해석 모듈인 EMRC/Endure를 사용하였으며 응력확대계수는 CTOD법을 사용하여 계산하였다. 해석은 20절점 요소와 15절점 요소를 병행하여 사용하였으며 초기균열길이 13mm에서 시작하여 3mm 간격으로 균열을 성장시켜 해석을 수행하였다.

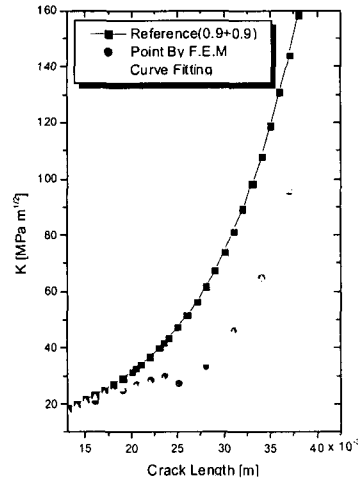


Fig. 6 The variation of stress intensity factor

두께 변화에 대한 해석을 명확히 하기 위하여 두께가 변화하는 구간에서는 균열 성장길이를 세분화 하여 해석을 수행하였다. Fig. 6은 해석결과로 초기균열길이 13mm에서는 두께변화에 대한 영향이 미비하나 균열이 성장함에 따라서 두께변화에 대한 영향으로 응력확대계수의 값이 문헌값보다⁽¹⁸⁾ 저하됨을 알 수 있다.

유한요소해석을 통하여 얻은 두께 변화를 고려한 응력확대계수 값을 4차 다항식을 사용하여 보간하여 나타내면 다음과 같다.

$$K_I = F(a) \cdot \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$\alpha = \frac{a}{w}$$

$$F(\alpha) = -3.47146 + 34.67567\alpha - 71.02805\alpha^2 + 29.78993\alpha^3 + 31.10561\alpha^4$$

3.2.2 두께변화에 따른 피로균열 전파 거동

실험에 사용된 모재의 피로균열 전파거동을 Fig. 7에 나타냈다. 전형적인 균열전파 형태를 나타내고 있으며, 두께가 두꺼운 판재인 2.0mm 판

재에서 균열이 더 빨리 전파됨을 알 수 있다. 모재에 있어서 피로균열 전파 거동을 Paris's Equation 으로 나타내면 다음과 같다.

0.9mm 강판의 경우

$$\frac{da}{dN} = 2.0 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.081}$$

2.0mm 강판의 경우

$$\frac{da}{dN} = 7.17 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.085}$$

Fig. 8은 레이저 용접된 시험편의 피로균열 전파시험 결과를 나타낸 것으로 모재의 경우 전형적인 균열전파 현상을 나타내고 있고, 0.9mm 동일한 두께의 판재가 레이저 용접된 경우 용접부 주위에서 균열전파속도가 급변하는 것을 볼 수 있다. 이는 용접부와 모재 사이의 강도 불일치 현상과 용접 잔류응력에 의한 현상으로 판단된다. 0.9mm 판재와 2.0mm 판재가 레이저 용접된 경우는 동일한 두께의 판재가 용접된 경우보다 균열전파 속도가 큰폭으로 저하되고 응력확대계수 또한 동일한 균열길이에서 낮은 값을 가지게 되는데 이는 두께 변화로 인한 노치현상 때문인 것으로 판단된다. 유한요소 해석 결과 얻어진 Fig. 6을 살펴보면 균열길이가 약 15mm에 도달하면서 응력확대계수가 동일한 두께의 응력확대계수보다 저하됨을 알 수 있다. 마찬가지로 실험 결과 얻어진 Fig. 8에서도 균열길이가 약 15mm 이상 진전되면 동일한 두께의 판재가 용접된 경우보다 균열전파 속도와 응력확대 계수 값이 저하됨을 확인할 수 있어 유한요소 해석결과와 실험값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

한편 레이저 용접된 시험편의 경우 균열전파 속도가 용접 비드 부분에서 큰 폭으로 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 균열이 용접 비드 부분에서는 성장속도가 매우 둔화되어 정지 상태에 가까울 정도로 감소하며, 이후 용접 비드를 지나면서 균열 전파속도는 큰 폭으로 증가하여 용접 부분을 벗어나게 되면 모재와 동일한 양상으로

균열이 전파하게된다.

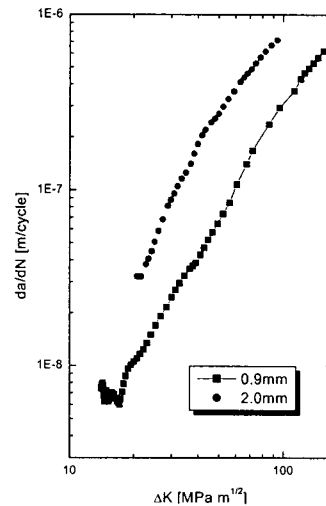


Fig. 7 Fatigue crack propagation of base metal

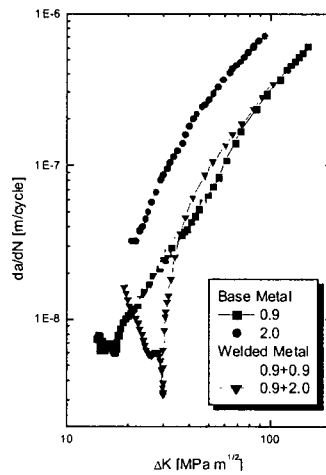


Fig. 8 Fatigue crack propagation of welded metal

이와 같은 현상은 Fig. 9의 균열의 전파 형상을 나타낸 결과에서도 잘 나타나고 있는데, 균열이 발생하여 용접비드 부분까지는 일반적인 저탄소강에서 나타나는 균열 전파 형상을 나타내고 있는 것을 볼 수 있으며, 균열전파가 더욱 진전되어 균열선단이 용접 비드 부분에 이르면 균열 성

장속도가 현저하게 둔화되면서 성장하는 균열의 폭이 모재의 균열 폭 보다 넓게 성장하는 것을 볼 수 있다. 용접 비드 부분에서는 파괴 인성치의 감소로 인해 균열의 전파속도가 급격히 증가하게 되고 피로균열의 형상도 이전 보다 가늘게 나타나고 있다. 그러나 이런 현상은 균열성장이 계속 진행되어 비드 부분을 통과하게 되면, 다시 용접 비드를 통과하기 직전의 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 용접 비드 부분과 모재부분의 강도값의 차이에서 기인된 것으로 판단된다. 앞에서 고찰한 바와 같이 용접 비드 부분은 모재부분 보다 경도값이 약 2.3배 증가했는데, 경도의 증가는 강도의 증가를 의미하며 또한 파괴인성치의 감소를 의미한다. 따라서 모재부분에서 균열이 전파하다 용접 비드 부분에 이르면 일단 비드 부분의 증가한 강도값에 의해 일정 시간 균열 성장이 지연되게 되고, 이후 균열이 조금씩 성장함에 따라 용접 비드 부분에 다다르면 결국 비드 부분의 감소된 파괴인성치로 인해 균열전파가 급격히 진행되게 된다고 판단된다.

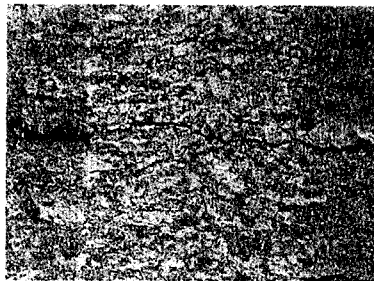


Fig. 9 The shape of fatigue crack around welding zone

3.3 균열선단의 응력 분포 및 소성역

균열 성장에 따른 균열 선단에서의 응력분포와 소성역 형상을 고찰하기 위해 상용 유한요소해석 코드인 ABAQUS를 사용하여 탄소성 해석을 수행하였다. 시험편의 모델링은 균열을 중심으로 상하 대칭을 이루고 있으므로 1/2 모델을 사용하였고, 균열의 진전은 대칭면의 구속 조건을 조절하는 것으로 표현하였다. Fig. 10은 해석에 사용

된 시험편의 유한요소 모델로 중앙에 좁게 나타나 있는 부분이 용접 비드이다. 열영향부는 조직 관찰과 경도 측정 결과 아주 작은 영역에 분포하고 있으므로 유한요소 해석에는 고려하지 않았다.

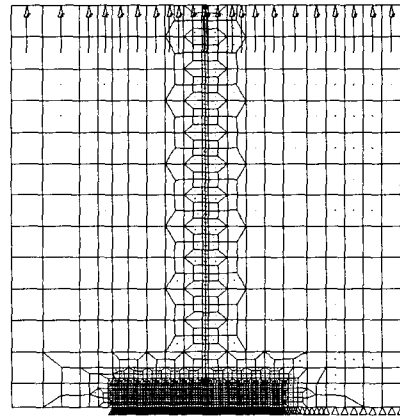


Fig. 10 Analysis model for F.E.M

Fig. 11은 균열이 비드 중앙부 전방 3mm 까지 성장하여 균열길이 22mm가 되는 지점에서의 응력 분포로 비드부에 큰 응력이 발생하는 현상을 관찰 할 수 있는데 이는 비드부와 모재부의 강도차에 기인한 것으로 모재 보다 상대적으로 항복강도가 높은 비드부분이 균열 전파 속도 지연에 지대한 영향을 미치고 있다는 것을 나타내 주고 있으며, 실험결과 얻어진 균열 전파 거동을 잘 설명하고 있다. 비드부분이 큰 응력을 지탱하므로 균열 전파 속도 지연 현상을 초래하고, 이때 균열 전파 양상은 Fig. 9에 나타난 바와 같이 균열 폭이 넓게 성장하게 된다.

Fig. 12는 균열 선단의 소성역 형상을 나타낸 것으로 균열이 22mm 진전하였을때의 소성역 형상을 나타낸 것이다. 레이저 용접으로 생성된 좁은 영역의 비드는 향상된 항복강도의 결과로 상대적으로 모재 부분보다 소성역이 작게 형성되어 균열선단에서의 전체적인 소성역 형상을 불규칙하게 만든다.

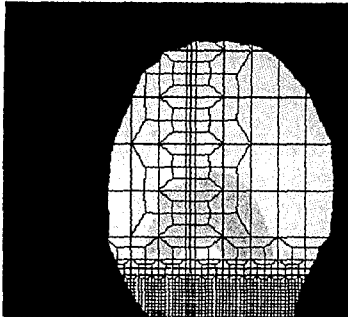


Fig. 11 Stress contour at crack tip

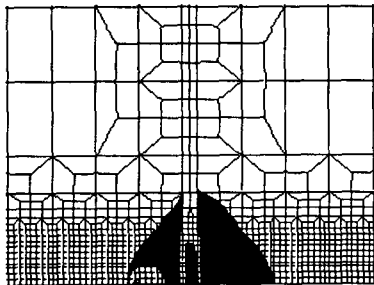


Fig. 12 The shape of plastic zone

4. 결론

자동차 차체제작에 이용되는 냉간 압연강판에 대해 레이저 용접을 수행한 후 용접부의 구조 안정성을 고찰하기 위해 기초 물성 실험과 피로균열 전파시험을 수행하였다. 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하중방향과 평행으로 레이저 용접되었을 경우가 모재보다 약 10% 인장강도가 증가하였으며, 용접부분의 경도실험 결과 열 영향부 등의 기계적 성질 저하는 거의 나타나지 않았으며 용접 비드 부는 모재부보다 약 2.3배 높은 경도값을 나타냈다.

2) 유한요소 해석 결과 두께가 다른 강판의 접합시 두께변화 부분의 노치효과로 인하여 동일한 두께 강판의 접합시 보다 낮은 응력확대계수 값을 나타냈으며, 응력확대계수의 저하는 초기 균열 성장시에는 대등한 값을 보이지만 두께가 변화하는 부분에서는 큰 차이를 보였다.

3) 피로 균열의 전파형태는 모재 부분에서는

일반적인 거동 형태를 보이다가 용접 비드 부근에서는 강도의 증가로 인한 일정부분의 균열 성장 지연 현상을 나타낸다. 이후 균열이 성장함에 따라 용접 비드 부분에서는 감소한 파괴인성치로 인해 전파속도가 급격히 빨라지고 균열의 형상도 가늘게 나타난다.

4) 탄소성 해석 결과 레이저 용접으로 생성된 좁은 영역의 비드는 향상된 항복강도의 결과로 비드부분이 큰 응력을 지탱하므로 균열 전파 속도 지연 현상을 초래하고 상대적으로 모재 부분보다 소성역이 작게 형성되어 균열선단에서의 전체적인 소성역 형상을 불규칙하게 만든다.

후 기

본 논문은 원자력 기초연구사업 지원과 고등기술연구원 의 시험편 협조를 받았으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) A. P. Lee, E. Feltham and J. V. Deventer, "Tailor Welded Blank Technology for Automotive Applications", SAE 960817, 1996.
- 2) W. Prange, C. Schnelder and A. J. Sellge, "Application of Laser-Beam-Welded Sheet Metal" SAE 890853, 1989.
- 3) A. J. Selige and W. Prange, "Production and Usage of Laser Beam Welded Sheet Metal", SAE 970413, 1997.
- 4) L. Hanicke and O. Strandberg, "Roof Laser Welding in Series Productions", SAE 930021, 1993.
- 5) 서정, 한유희, 김정오, 이영신, "이종두께 강판의 CO2 레이저 용접 및 성형성" 대한용접학회지, 제 14권 1호, pp. 82-91, 1996.
- 6) J.-R. Hwang, J.-L. Doong and C.-C.

- Chen, "Fatigue Crack Growth in Laser Weldments of Cold Rolled Steel" Materials Transactions, JIM, Vol. 37, No. 8, pp.1443-1446, 1996.
- 7) M. F. Shi, "Effects of Strain Gradient and Curvatures on Forming Limits Diagram for Anisotropic Sheets", J. Mat. Shaping Technol., Vol. 9, pp.45-52, 1991.
- 8) M. F. Shi, "Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheets", SAE 930278, 1993.
- 9) R. B. Wilson and T. E. Fine, "Fatigue Behavior of Spot Welded High Strength Steel Joints" SAE 810354, 1981.
- 10) D. H. Orts, "Fatigue Strength of Spot Welded Joints in a HSLA Steel" SAE 810355, 1981.
- 11) J. A Davidson and E. J. Imhof. "The Effect of Tensile Strength on the Fatigue Life of Spot-Welded Sheet Steels" SAE 840110, 1984.
- 12) P. C. Wang and K. M. Ewing, "A Comparison of Fatigue Strengths : Laser Beam vs. Resistance Spot Welds" Welding Journal, October, pp.43-47, 1991.
- 13) C. S. Lin, "Fracture Mechanics Characteristics of Laser-Welded Aluminum- Lithium Sheet Joints", SAE 881405, 1988.
- 14) 오택열, 권윤기, 이종재, 곽대순, "레이저 용접판재의 피로거동" 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, pp.339-344, 1999.
- 15) 이억섭, "자동차 공업에서의 피로/파괴 예방", 자동차공학회지 Vol. 12 No. 5 pp.2-9, 1990.
- 16) 이건상, "자동차 생산공정에서의 레이저 응용", 자동차공학회지, Vol. 19 No. 1 pp.47-60, 1997.
- 17) 이경돈, 인정제, 권재욱, 유병길, 강연식, "Tailored Blank 적용을 위한 생산기술", 자동차공학회 구조강도부분 학술 강연회, 1999. 5.
- 18) Y. Murakami, "Stress intensity factors handbook", The society of materials science, Japan, Vol. 1, p. 6.