

研究論文

## 初期 過荷重이 點熔接 引張剪斷 試驗片의 疲勞舉動에 미치는 影響

강 성 수\* · 정 원 옥\*\*

### The Influence of Initial Overloads on the Fatigue Life of Spot-welded Tensile-shear Specimens

S. S. Kang\* and W. W. Jung\*\*

**Key Words** : Initial Overload(초기 과하중), Unload Strain(제하 변형률), Strain Range(변형률 범위), Fatigue Crack Initiation(피로균열발생), Spot Welded Tensile Shear Specimens(점용접 인장전단 시편). Over Load Ratio(과하중비 OLR)

#### Abstract

The factors affecting on the fatigue strength of spot-welded specimens have been studied. The influence of initial overloads on the fatigue life of spot-welded tensile-shear specimens is investigated by considering fatigue crack initiation and crack propagation. The change of strain range and the influence of initial overload are correlated on the basis of strain results.

The results of this study are as follows ;

- 1) The initial absolute strain range decreased with initial overloads increase, and absolute strain range decreased before transformation of waveform of strain, but increased after transformation of waveform of strain.
- 2) In case of subsequent point of inflection of offset strain, the increment of this strain decreased with initial overload increase.
- 3) As initial overloads increase, the deformation behavior of spot welded parts is restricted after overloading.

#### 1. 서 론

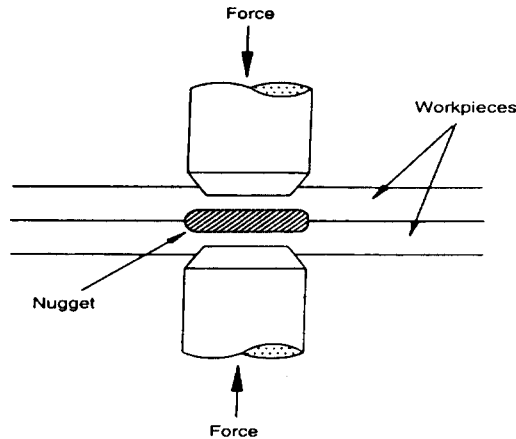
점용접은 피용접재인 박판을 두 장 이상 겹쳐서

전극팁 사이에 넣고 상하에서 가압하면서 극히 짧은 시간내에 이루어지므로 생산성이 높고 절차가 간단하며 자동화, 대량생산 등이 쉽기 때문에, 자동차 차체, 항공기 구조, 철도차량등 높은 내구성

\* 정희원, 부산대학교 기계공학과, 정밀정형및 금형가공 연구센터

\*\* 정희원, 현대자동차 차량시험부

과 신뢰성이 요구되는 박판구조에 널리 사용되고 있으며<sup>1)</sup> 점용접의 대략적인 과정을 Fig. 1에 나타내었다.



**Fig. 1** Schematic illustration of spot welding process (금속판을 포개어 놓고 전극끝을 금속판 아래 위에 대고 비교적 작은 부분에 전류 및 가압력을 집중시켜 국부적으로 가열하는 동시에 전극으로 압력을 가하여 용접)

그러나 점용접부는 직경 수 mm의 점상으로 접합되므로 응력집중의 발생원이 되어서 피로강도면에서 유리한 구조가 되지 못한다.<sup>2-4)</sup> 그래서 일본 등에서는 점용접부의 피로강도를 높이려는 용접성 연구와 피로강도를 통일적으로 평가하려는 피로강도 평가연구가 활발히 진행되어 왔다.<sup>5, 6)</sup>

이러한 연구는 주로 시험편의 형상, 부하 방식, 피로 시험 방법등 역학적인 면의 연구, 점용접 재료의 연구, 그리고 점용접 자체의 용접성에 관한 연구와 같이 세 부분으로 나눌 수 있다.<sup>7)</sup> 그 중에서도 부하 방식에 의한 영향을 연구하는 부분에서는 실제적으로 점용접부에 작용하는 하중이 어떤 형태인지 확인하기가 어렵기 때문에 많은 어려움이 있다.<sup>8-10)</sup> 그래서 점용접부의 시험편의 형태를 인장 전단, +자형 인장 전단, T형 인장, 상자형등 다양하게 제작하여 연구하여 왔다.<sup>11, 12)</sup>

그러나 이런 많은 연구들은 일정 진폭 하중 하에서 피로시험을 실시하였기 때문에 실제 자동차가 달릴 때 받게 되는 여러 가지 진폭의 하중을 고려할 수가 없었다. 그러므로 지금까지 점용접부에 대한 연구들은 점용접부가 받게 되는 충격하중이나 과하중의 영향들을 무시한 연구였던 것이

사실이다<sup>13)</sup>.

그래서 실제 자동차가 받게 되는 여러 가지 진폭의 하중을 받을 때 점용접부가 어떻게 반응할 것인지 그 기초적인 연구가 필요하며, 가장 먼저 해결되어야 할 과제는 평균적인 일정 진폭 하중 외에 받게 되는 과하중의 영향일 것이다. 특히 초기 과하중이 점용접에 어떤 영향을 주는지를 규명하는 것이 필요하다. 그래서 그 결과를 사용하여 피로시험이나 시작차 평가 단계에서 나타나는 결과를 분석하는데 활용할 수 있는 기초적인 자료가 될 수 있다.

그러므로 본 연구는 자동차 차체 점용접부의 인장전단 시험편에 가한 초기 과하중이 피로거동에 미치는 영향을 피로균열의 발생거동, 성장거동과 함께 연구하였다. 또 평가 방법으로는 현장에서 가장 많이 사용되어지고 있고 현재 많은 연구가 진행되어지고 있는 스트레인 게이지를 이용하여, 과하중이 없을 경우의 변형을 범위 변화의 거동과 과하중을 받았을 경우의 변형을 범위 변화의 거동의 차를 통해 초기 과하중이 점용접 박판구조의 피로거동에 미치는 영향을 분석 검토하고자 한다.

## 2. 초기 과하중의 적용 및 영향

과하중이란 일정 진폭하중이 작용하고 있을 때에 이보다 큰 하중 폭을 가진 하중이 작용할 때 이것을 과하중이라고 하며 인장 과하중과 압축 과하중이 있다. 인장 과하중은 과하중 중에서 마지막 과하중이 인장하중일 경우이며 압축 과하중은 압축하중일 때이다. 일반적으로 인장 과하중은 일시적으로 균열성장속도를 감소시키거나 균열이 진전하는 것을 완전히 정지시키는 반면에 압축과하중은 균열성장을 가속화시키는 경향이 있다는 사실은 이미 알려진 사실이다.

Fig. 2는 하중 파형과 변형을 출력 파형과의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다.

여기서 과하중비(OLR)는 초기 과하중의 최대하중과 일정진폭 반복하중의 최대하중의 상대적인 비를 나타낸 것이다.  $\epsilon_{\text{maxload}}$ 는 한 사이클의 하중파형 중에서 최대하중이 작용할 때의 변형울값을 나타낸다.  $\epsilon_{\text{minload}}$ 는 한 사이클의 하중파형중에서 최소하중이 작용할 때의 변형울 값을 나타낸다.  $\epsilon_{\text{max}}$ 는

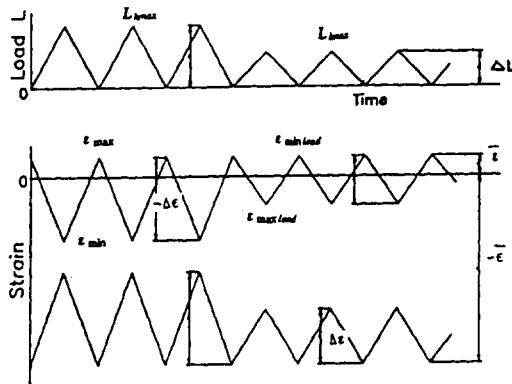


Fig. 2 Schematic illustration of relation between load waves and strain output waves obtained from strain gage

한 사이클의 변형률중에서 최대치를 말하여,  $\epsilon_{min}$ 는 한 사이클의 변형률 값 중에서 최소치를 말한다. 변형률범위( $\Delta\epsilon$ )는  $\epsilon_{max/load}$ 와  $\epsilon_{min/load}$ 의 차이 값을 나타내며 (+)또는 (-)의 값을 가진다. 변형률 범위가 (+)인 것은 변형률 파형이 하중 파형과 동상의 파형임을 나타내고 (-)인 것은 역상의 파형을 의미하는데 점용접부에서는 주요 외면변형률 범위는 (-), 내면변형률범위는 (+)로 나타난다. 그리고 외면의 압축변형률의 절대값이 내면의 인장변형률의 절대값보다 작다는 것도 유효요소법 해석을 통하여 알려졌다<sup>2)</sup>.

절대변형률 범위는  $\epsilon_{max}$ 에서  $\epsilon_{min}$ 을 빼 준 값을 나타내며 항상 양의 값을 가진다. 제하변형률(unload strain)은 하중을 제거하였을 때의 변형률 값이다. Fig.2의 맨 위 그림은 초기 인장 과하중이 작용한 후 일정진폭 반복하중을 작용할 경우의 하중 파형 곡선이며 중간의 그림은 하중 파형과 역상의 변형률 파형을 나타낸 것이다. 맨 아래 그림은 하중 파형과 동상의 출력을 하는 변형률 파형을 나타낸 것이다.

아직까지 점용접부에 이런 초기 과하중을 작용시켜서 연구를 한 경우는 없지만 점용접부를 환상의 균열로 본다면 Crews의 실험과 비슷한 경향을 나타내리라 유추할 수 있다<sup>4)</sup>.

阿部博司, 佐藤次彦 등의 실험에서는 변형률 범위가 극히 작은 값이 될 때까지는 변형률 범위는 하중 파형과 동상이며 그 이후에 역상이 되었다<sup>15, 16)</sup>. 이것은 그들이 스트레인 게이지를 점용접부 압흔단에 부착하였기 때문에 하중 파형에 대해 동상에서 역상으로 변형률 파형이 변화되었지만 본 실험에서는 너깃단 1mm지점에 스트레인 게이지를 부착하였기 때문에 변형률 파형이 하중 파형에 대해 역상에서 동상으로 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이 변형률 게이지에서 얻어진 전체 변형률 출력 중에서 단성적인 변형률에 상당하는 변형률 범위의 변화율을 피로균열의 발생시기 또는 피로균열성장을 검출하는 신호로 사용하였다<sup>5, 6)</sup>.

### 3. 실험준비 및 방법

#### 3.1 실험 재료

본 연구에 사용한 재료는 현재 자동차 차체로 사용되고 있는 고장력강을 사용하였다. 모재의 물성치는 Table 1에 나타내었으며 판두께는 0.7mm이다. 인장강도가 항복응력보다 두배 가까이 큰데, 이것은 고인장강도를 가지면서 프레스 가공성을 좋게 하는데 유리한 것으로 알려져 있다<sup>7)</sup>.

#### 3.2 시편 및 치구 형상

시편의 점용접은 자동차 공장의 현장에서 실시하였으며, 용접 조건은 인장시험시 가장 큰 인장력을 가질 때의 조건으로 압축력을 2.35 kN, 용접 전류를 11 kA, 통전시간을 18사이클, 유지시간을 12사이클, 개방시간을 10사이클로 하여 실시하였다. 용접조건은 Table 2에 정리하였다. 또 전극은 지름이 6mm인 BD형(수직 평면형) 전극을 사용

Table 2. Spot welding conditions

Welding force (kN)	Electrode (mm)	Welding current (cycle)	Welding time (cycle)	Holding time (cycle)	Off time (cycle)
2.35	BD 6.0	11	18	12	10

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of base metals

Chemical composition(wt %)					YP	TS	EL
C	Mn	P	S	AL	MPa	MPa	%
0.03	0.27	0.62	0.09	0.25	182.3	357.7	40

하였다.

시편의 형상은 Fig. 3과 같이 단점 점용접부 인장전단 시험편으로 만들었는데, 전체 길이는 240 mm, 너비는 40 mm 이며, 두개의 판이 겹치는 길이는 40 mm로 제작하였다. 그리고 시편의 양단에 지름 13 mm의 치구연결용 구멍을 2개씩 뚫되 비틀림 하중이 작용하지 않도록 하기 위해 너깃단과 일직선상으로 제작하였다.

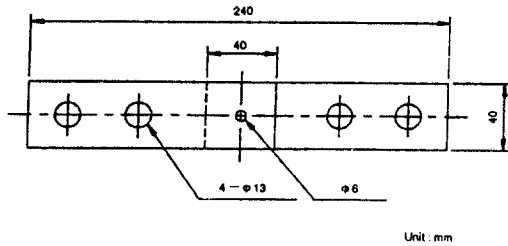


Fig. 3 Shape of spot welded tensile shear specimen

Fig. 4에 나타난 치구는 피로시험기와 시편을 연결시키고 하중이 정확히 전달되도록 하기 위해 제작한 것이다. 그리고 변형을 값을 측정하기 위하여 길이가 2 mm인 일반 스트레인 게이지를 Fig. 5와 같이 너깃단 1 mm지점에 하중축과 일직선상으로 접착하였다. 그리고 터미널을 붙여서 스트레인 게이지에 충격이 작용하지 못하도록 하였다.

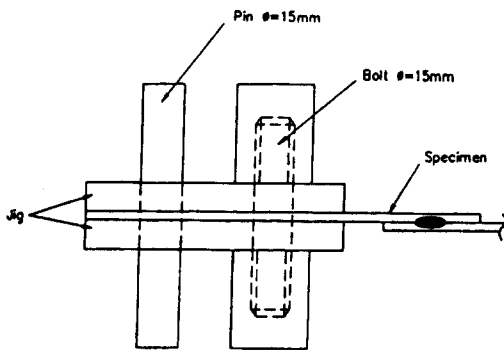


Fig. 4 Shape of jig to fix the specimen

### 3.3 실험 방법

초기 과하중이 없는 일반 피로시험은 JIS Z 31 38규격에 따랐다. 단축 인장압축 피로 시험기를 사용하여 R=0의 편진인장하중을 주었다. 하중의

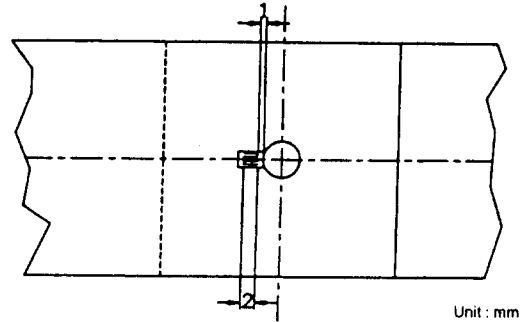


Fig. 5 Bonding position of strain gage

반복속도는 14 Hz로 하였다. 앰프는 측정 가능한 최대 변형을범위가 10000  $\mu\text{e}$ 인 것을 사용하여 2000  $\mu\text{e}$ 로 세팅하여 사용하였다. 디지털 오실로스코프를 사용하였으며, 오실로스코프로 데이터를 저장할 때 한점당 시간간격은 0.5 msec로 하고, 전체 전압 범위는 200 mV로 하였고, 100 kHz의 필터를 사용하였다. 변형을 값과 파형은 각 파형의 모양과 최대 최소값의 변화량을 오실로스코프로 관찰하면서 데이터 기록기를 사용하여 디스크에 저장하였다. 이때 저장 간격은 변형율과 파형과 범위가 별로 변하지 않는 초기에는 약 5000 사이클에서 10000 사이클 사이의 시간간격을 두고 저장하였으나 변형율 범위 값이나 파형이 급속히 변하기 시작하는 시기에 와서는 500 사이클에서 1000 사이클 정도의 시간간격을 두고 저장하였다. 그리고 저장된 데이터를 컴퓨터와 데이터 기록기를 연결시켜 컴퓨터에서 분석하였다.

실험장치의 전체적인 흐름도는 Fig. 6에 나타나 있다.

본 실험에서는 초기 과하중을 기본적으로 1.27 kN, 1.47 kN의 일정진폭 반복하중에 대하여 초기 과하중비가 1.5, 2.0이 되도록 하여 초기 과하중을 준 후에 일정진폭 하중상태에서 균열이 시편의 너깃의 길이 만큼 성장할 때까지 피로시험을 실시하였다. 각 부분에 대해서 실험하여 중간치인 시편의 데이터를 정리하였다. 초기 과하중을 걸어줄 때는 3.7 Hz정도의 편진 인장하중을 사용하였다. 초기 과하중의 수는 20 사이클로 하였는데 그 이유는 한 두번의 과하중을 작용한다면 안정된 과하중의 값을 작용시키기가 어렵고 너무 많은 초기 과하중은 오히려 손상효과를 가져올 것이기 때문이다.

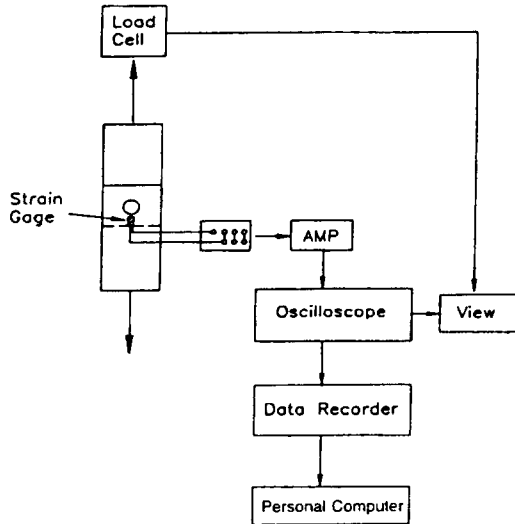


Fig. 6 Schematic diagram of experimental instrumentation

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 제하변형율에 의한 피로수명 측정

본 연구에서는 피로균열 발생 수명을 측정하기 위하여 제하변형율(unload strain)을 측정하여 그 변화량이 급속히 이루어지는 시기를 균열이 발생하여 진전하는 시기로 잡았다. 본 실험에서는  $R=0$ 로 하여 최소하중( $L_{min}$ )이 작용할 때의 변형율 값이 제하변형율이 된다.

그리고 과하중을 가하였을 경우 수명초기에 제하변형율 값이 (+)의 값을 가지는 것을 볼 때 초기 과하중이 시편의 탄성한도 이상의 하중으로 작용하기 때문에 판내부 인장의 소성변형이 판외부의 인장 소성변형보다는 더욱 많이 일어나고 이것 때문에 과하중의 정도에 따라 균열 발생과 성장 거동에 영향을 미친다고 생각한다.

Fig.7은 과하중비(OLR)가 1.5 이고 하중범위가 1.27 kN인 시험편에 대하여 하중 파형에 대한 변형율 파형의 상이 바뀌는 시점에서 각 사이클에 대한 파형을 비교한 것이다. 처음에는 하중에 대해 역상의 모양을 하고 있던 파형이 나중에는 동상으로 바뀌는 것이 나타난다.

이것은 원래 점용접부에는 판내면과 판외면의 변형율 값이 반대를 가지며 특히 판외면의 경우

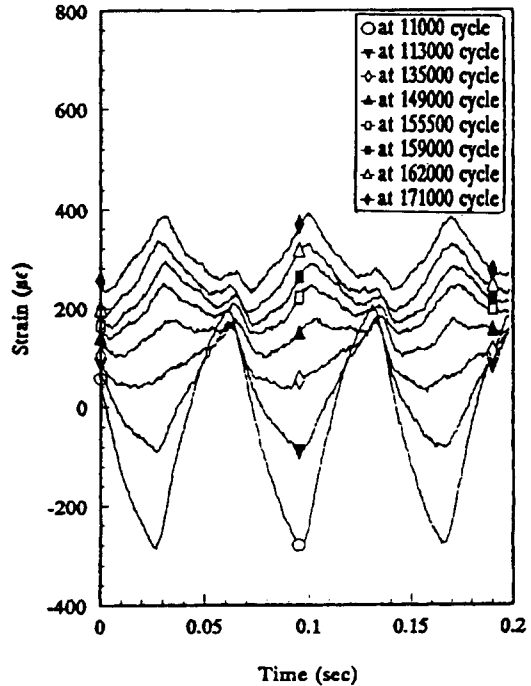


Fig. 7 The waveform of strain from 11000 cycles to 171000 cycles (OLR=1.5,  $\Delta L=1.27$  kN,  $R=0$ )

에는 인장에 대해 압축변형을 받게 되고 인장 잔류응력이 남게 된다. 그런데 판 내부에서 균열이 성장함에 따라 외면이 인장하중을 받게 되어 하중에 대해 역상(-)의 반응을 보이던 외면 변형율이 동상(+)의 반응을 보이게 되는 것으로 생각되며 Fig. 8과 같이 표시될 수 있다.

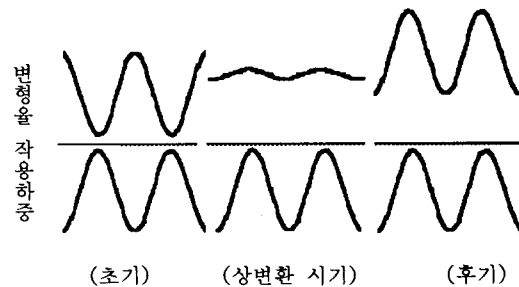


Fig. 8 작용 하중과 변형율의 관계

그러므로 점용접부의 어느 특정 부분에서 하중에 대한 변형율 출력의 상변화를 통하여서도 내

부에서의 균열의 진전 여부와 피로수명을 예측할 수 있을 것으로 생각된다. 즉 Fig. 7에서 알 수 있듯이 15만 사이클 이후부터 상변화가 확연히 일어나며 인장변형율이 급속히 증대되어 곧 파단됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 제하변형율과 수명과의 관계를 나타낸 것이다.

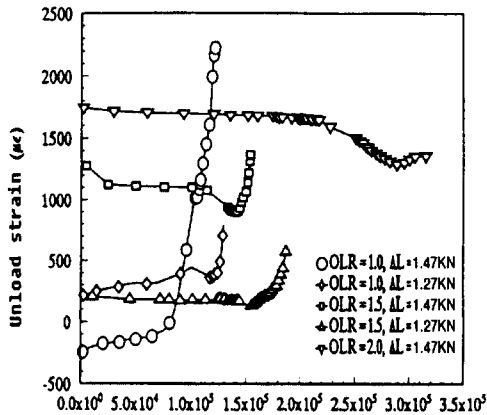


Fig. 9 The relationship between unload strain and number of cycles

이 그림을 통하여 각 시편의 균열 발생수명과 진전수명을 비교할 수 있다. 제하변형율-수명 곡선은 초기 과하중의 조건에 관계없이 처음부터 거의 일정한 기울기를 가지고 있다. 균열발생수명이 되면 기울기가 갑자기 변하기 시작하는 것을 알 수 있다. 또 초기 인장 과하중이 없는 경우 (OLR1.0)에는 제하변형율의 값이 계속 증가하지만 초기 과하중이 있는 경우에는 오히려 감소하는 경향을 보이다 균열 발생이후부터 증가하는 것으로 나타났다. 과하중의 정도에 따라 초기 제하변형율은 다르지만 일정 진폭하중을 가하였을 때의 제하변형율의 변화율은 거의 일정함을 알 수 있다. 일정 진폭 하중이 1.27 kN일 때 과하중을 주지 않았을 경우와 1.5의 과하중비율을 가지는 과하중을 주었을 경우의 제하변형율 변화를 비교해보면 이런 현상을 바로 알 수 있다. 이 경우에 초기 제하변형율 값은 비슷하지만 과하중을 받지 않은 시편은 제하변형율이 계속 증가하는데 비하여 과하중비율을 1.5로 하여 과하중을 준 경우는 제하변형율의 값이 오히려 약간 감소하는 것을 알 수 있다.

또, 본 실험 범위내에서는 초기 과하중의 정도가 클수록 제하 변형율 변곡점 이후의 제하변형율 증가 정도가 적었고 초기 제하변형율 보다 감소하는 경향을 보였다.

#### 4.2. 과하중비에 따른 피로수명

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 각 과하중비(OLR)에 따른 전피로수명( $N_f$ )과, 균열발생수명( $N_i$ ), 균열진전수명( $N_p$ )을 하중-수명선으로 표시한 것이며 가로축은 수명 세로축은 하중으로 하여 점으로 나타내었으며 각 과하중비에 따른 점들을 통계처리하여 50% 파괴 확률선으로 나타내었다. 피로강도 곡선은 대수 좌표에서 직선으로 나타나고 이는 일차식으로 표현 가능하다<sup>17, 18)</sup>.

Fig. 10에 나타난 하중과 전피로수명과의 관계곡선에 의하면 1.6 kN 부근에서 과하중비 1과 과하

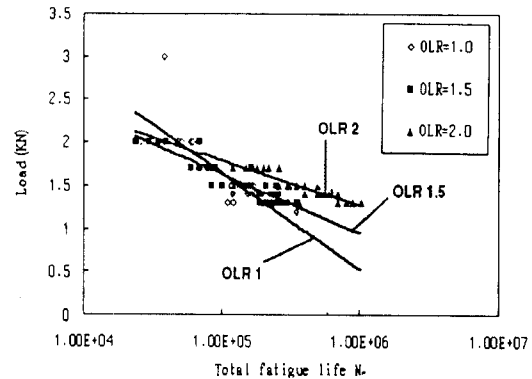


Fig. 10 The relationship between load range and total fatigue life

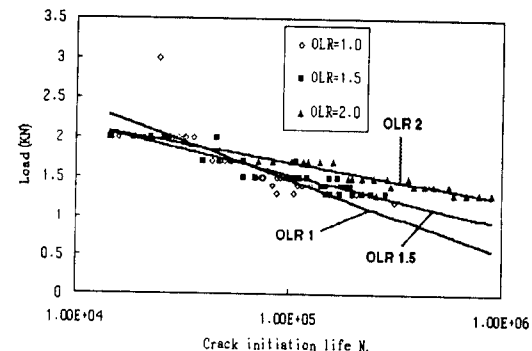


Fig. 11 The relationship between load range and crack initiation life

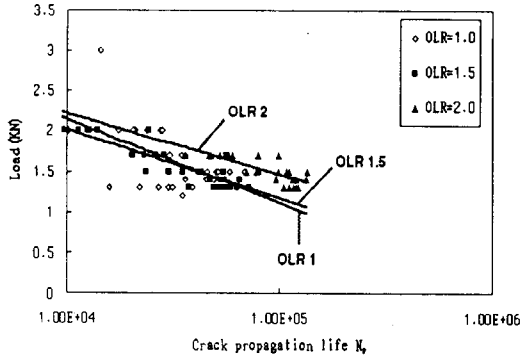


Fig. 12 The relationship between load range and crack propagation life

중비 1.5의 회귀선이 교차하고 있으며 이에 따라 1.6 kN 이하의 하중에서는 과하중비의 증대에 따라 일정한 하중 조건에서 전피로수명은 증대되어 가는 경향을 알 수 있고, 2 kN 부근에서 과하중비 1과 과하중비 2의 회귀선이 교차하고 있으며 2 kN 이상의 하중범위에서는 과하중비의 증대가 피로수명을 감소시키는 경향을 나타내고 있다. 따라서 하중을 받는 부위의 하중크기에 따라서 초기 과하중이 피로수명을 연장시킬 수도 있고 오히려 피로수명을 단축시킬 수도 있음을 알 수 있으므로 실사용조건 하중을 정확히 파악한 후 적절한 초기 과하중의 적용이 고려되어야 할 것이다.

예로 Fig. 10에서 1.5 kN의 하중범위에서는 초기 과하중을 1.5배 주었을 경우 전피로수명은 초기에 인장 과하중을 주지 않은 일반 피로수명에 비해 1.5배 증가하고 초기 인장 과하중을 2배로 가할 경우의 전피로수명은 일반 피로시험의 전피로수명에 비해 약 5배 증가함을 알 수 있다.

Fig. 11은 하중에 따른 제하변형률의 변화량이 급격히 증대하기 시작하는 균열발생수명과 관계 나타내는 그림으로 초기 과하중을 증대시키에 따른 균열발생수명 시점과의 관계는 Fig. 10의 하중과 전피로수명과의 그래프와 같은 경향을 보이고 있으며 일정하중 이하에서는 초기 과하중비의 증대에 따라 균열발생수명을 증대시키고 어느 하중 이상에서는 과하중비가 증대할수록 균열발생수명이 감소됨을 의미한다. 또 하중범위가 1.7 kN 부근에서는 전피로수명중 60%가 균열발생수명이며, 1.5 kN 부근에서는 전피로수명중 70%가 균열발생수명이며, 1.3 kN 부근에서는 전피로수명중 80%가

균열발생수명이다. 이는 하중이 낮아질수록 전체수명에서 균열발생수명의 비율이 높아져가고 있음을 나타내며 낮은 하중조건에서는 균열발생수명이 전피로수명의 대부분을 차지한다.

Fig. 12는 하중과 균열진전수명과의 관계를 나타낸 그래프로 Fig. 10 및 Fig. 11과 같은 경향의 그래프를 나타내고 있으며 전체수명에 대한 균열진전수명의 비율은 하중범위 1.7 kN 부위에서는 전피로수명중 40%가 균열진전수명이며 1.5 kN 부근에서는 30%, 1.1 kN 부근에서는 20%가 균열진전수명이다. 균열진전수명은 고하중 범위에서 그 의미가 크다.

낮은 하중범위에서 초기의 인장 과하중에 의해 피로수명이 증대된 것은 초기의 인장 과하중에 의해 초기 소성변형이 커지고 그에 따라서 점용접부 내면의 압축잔류응력이 발생하며 국부소성에 의한 균열 발생부의 가공경화가 균열 발생을 크게 억제한 것으로 판단된다. 이것은 Fig. 9에서 제하변형률이 초기에 많이 발생 하였으나 반복회수의 증가에 따라 제하변형률이 오히려 감소되고 있는 것으로도 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 자동차 차체 점용접부의 인장전단 시험편에 초기 인장 과하중을 가하여 과하중비에 의한 전피로수명, 균열발생수명, 균열진전수명의 변화를 변형률 출력값을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기 과하중의 정도가 심할수록 초기의 절대변형률범위가 더 작아졌으며, 변형률 파형의 상변화 전까지는 절대변형률범위가 작아지다가 변형률 파형의 상변화 후에는 커졌다.
2. 제하변형률과 수명곡선의 변곡점 이후의 경우에는 초기 과하중이 클수록 제하변형률 증가가 적었고, 후기 제하변형률이 초기 제하변형률 보다 감소하는 경향을 보였다.
3. 초기 과하중이 클수록 과하중후의 점용접부 변형 거동이 크게 억제되었다.
4. 일정하중을 기준으로 하여 그 이하의 하중범위에서는 과하중비가 증대 할수록 피로수명이 증대 되었으나 그 이상의 하중범위에서는 과하중비가 증대 할수록 피로수명은 감소하였다.

5. 초기 과하중이 없을 경우 피로사이클의 증가에 따라 제하변형율이 증대하나 초기 과하중이 있는 경우 제하변형율은 감소하며 상이 변한 후 제하변형율은 급격히 증대 된다.
6. 반복하중이 낮아질수록 전체수명에 비해 균열발생수명의 비율이 높아진다.

## 후 기

이 논문은 1993년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 학술연구 조성에 의하여 연구가 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 서창민, 강성수 : "고장력 강판과 아연도금 강판간의 점용접 피로특성", 대한 기계학회 논문집, 제 12권 제 4호, PP. 747-754, (1988)
2. H.L.Oh : "Fatigue-Life Prediction for Spot Weld using Neuber's R1ule", ASTM STP 761 pp.296-309.
3. R.B. Wilson, F.E.Fine : "Fatigue Behavior of Spot Welded High Strength Steel Joints", SAE 810 354, (1981)
4. Y.R.Kan : "Fatigue Resistance of Spot Welds-An Analytical Study", Metals Engineering. Vol 26 pp.26-36, (1976)
5. 北川英夫, 結城良治, 東郷敬一郎 : "K<sub>I</sub> と K<sub>II</sub> の混合モ 동시裂からの疲勞龜裂成長舉動", 日本機械學會論文集 A, 47卷 424號,, pp.1283-1292, (1981)
6. 宇佐見三郎, 志田茂 : "破壞力學による溶接繼手の疲勞強度評價", 壓力技術, 20卷 2號, pp.43, (1982)
7. 結城良治 : "スポット溶接繼手の疲勞強度評價

- への破壞力學の適用の現狀と問題 點", 日本精密機械, 50卷 10號, pp.1560-1567, (1985)
8. G.Matsoukaas, G.P.Steven, Y.M. Mai : "Fatigue of Spot Welded Lap Joints", Int. J. Fatigue, Vol.6, No.1, pp.55-57, (1984)
9. Pook.L.P : "Fracture Mechaincs Analysis of the Fatigue Behaviors of Spot Welds", Int.J.of Fracture, pp.173-176, (1975)
10. J.L.Overbeeke, J.Draisma : "Fatigue Characteristics of Heavy-duty Spot Welded Lap Joint", Metal Construction, pp.213-219, (1984)
11. 結城良治, 大平壽昭, 中務晴啓 : "破壞力學による溶接係數の解析", 自動車技術會 秋季學術研究會, (1984)
12. 小野, 田中, 結城, 大平 : 各種 スポット 溶接繼手試驗片の 疲勞強度と ひずみ舉動, 日本自動車技術會 秋季學術會, (1984)
13. F.Erdogan, G.C.Sin : "On tthe Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear", Trans. ASME(D), pp.519-527, (1963)
14. Crews, J.H.Jr : "Crack Initiation at Stress Concentration as Influenced by Prior Local Plasticity", ASTM STP 467 pp.37-52, (1970)
15. 阿部博司, 佐藤次彦 : "スポット 溶接繼手の疲れき裂の 非破壞 檢出方法 日本 溶接學會 論文集 第4卷 第 4號 pp.666-673, (1986)
16. 阿部博司, 佐藤次彦 : "多点スポット溶接繼手疲れの壽命評價のためのSAゲージ の開發とその檢討" 日本溶接學會論文集 第 10卷 pp.272-279, (1992)
17. Manual on statistical planning and analysis for fatigue experiments, ASTM STP 588, (1975)
18. Manual on fitting straight lines, ASTM STP 313, 1962