

Strain Energy Density법을 이용한 차체구조물의 균열발생위치 예측에 관한 연구

A Study on the predicting of Crack Initiation Position in Automotive Body by Strain Energy Density

정진우*, 장경복**, 정원욱***, 강성수**

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소

*** 현대자동차 차량시험 1팀

1. 서론

전기적인 저항을 이용하여 두께가 얇은 구조물을 국부적으로 용착시켜 접합하는 점용접은 가장 일반적으로 알려진 박판재의 접합 방식중 하나로서 극히 짧은 시간내에 용접이 이루어지므로 생산성이 높고, 내구성과 신뢰성 또한 높아서 자동차 박판구조의 접합에 널리 사용되어지고 있다.

승용차 한 대의 조립에는 보통 4000여점 정도의 점용접이 적용되게 되며, 승용차의 차체에서 발생되는 내구력상의 문제점 중 일반적으로 70%이상이 점용접 주위에서 발생하게 된다. 이와 같이 점용접 주위에서 문제점이 발생하는 것은 점용접부의 응력집중이나 용접불량에 의한 균열요인 제공 등에 주로 기인한다. 특히, 직경이 수 mm에 지나지 않는 용접점 주위에는 높은 응력이 집중됨으로 인해 피로강도가 모재의 그것에 비해 훨씬 떨어지기 때문에 차체의 구조적 강성과 강도가 용접점의 피로강도에 의해 결정된다고 해도 과언이 아니다.¹⁻²⁾ 따라서, 신뢰성 있는 차체 내구력을 확보하기 위해서는 점용접부의 정확한 특성이해나 피로거동연구에 대한 철저한 분석이 필요하다. 그런데, 여러 가지 재료에 대한 점용접부의 용접성³⁾과 피로특성에 대한 연구⁴⁾는 여러 연구자들에 의해서 그 자료가 축적되어 왔지만 자동차 차체에서 복합하중을 받고 있는 점용접부의 피로균열발생 및 균열성장 거동에 대한 연구는 아직 미흡한 상태이다. 일반적으로 피로균열의 발생과 전파의 원인을 파악하기 위한 수단으로 후판의 경우는 피로파단면에 나타나는 조개껍질 모양 혹은 비치마크라고 불리는 피로파면의 특유한 줄무늬모양을 이용⁵⁾하지만, 승용차차체의 경우는 판의 두께가 약 0.8mm~1.4mm로 매우 박판이기 때문에 이러한 방법으로는 균열의 발생과 성장을 파악하기 어렵다. 그러므로, 자동차 차체와 같은 박판의 경우에는 점용접부의 표면에 나타나는 균열의 발생과 성장의 거동으로서 피로파단의 원인을 파악하는 것이 타당하다. 왜냐하면, 하중의 이력, 균열발생과 성장거동의 관계를 데이터화하면, 현장에서 피로균열의 발생시 이를 저지할 수 있는 설계방안을 찾을 수 있기 때문이다.

이에 본 연구에서는 자동차 내구성능 테스트 시 발생하는 차체 구조물의 피로균열 발생 및 성장의 원인을 파악하기 위한 일환으로서 점용접 시험편을 제작하여 동적시험을 수행하고, 작용하중과 점용접부의 균열발생 사이의 관계를 데이터화하였다. 또한, 이러한 실험데이터를 바탕으로 피로균열의 발생 및 성장거동을 예측할 수 있는 유한요소모델을 정립하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서 사용된 재료는 자동차 차체 및 각종 차량내부 판형부품에 많이 사용되고 있는 고장력 강판이며, 시험편형상은 Fig. 1로써 유한요소해석모델과 동일하다. 시편의 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같다. 또한, 최적의 점용접조건을 찾기위해 JIS Z 3136의 규격으로 인장전단시험편(Tensile-Shear Specimen)을 제작하고, 실험하여 최대의 인장전단강도를 가지면서 내부결합이 없는 용접부를 가지는 조건을 찾았고, 최적의 용접조건은 Table 3과 같다. 사용된 점용접기의 전극직경은 차체 제작 과정에 실제로 쓰이고 있는 6mm를 택하였으며, 피로시험장치는 Instron model No. 8501을 사용하였다. 본 실험을 위한 하중 반복속도는 20Hz이며, 피로하중의 형태는 하중비($R=P_{\min}/P_{\max}$) 0인 완전 편진 정현파이다. 하중의 형태는 2.5kN, 5kN으로 주었다. 균열의 판단은 시

험편 내표면 부하측 너깃단에서 발생 및 성장된 균열이 시험편 외표면에 나타나 육안으로 확인할 수 있는 3mm로 되었을 때를 피로균열로 결정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 판 외표면에서 각 하중별 균열의 발생과 진전양상을 거시적으로 나타내고 있다. 그림에서 (a), (b) 모두 피로균열은 하중이 작용하는 방향의 직각 방향에서 발생함을 알 수 있다. 균열의 형태를 보면 (a)는 균열선단이 비교적 날카롭게 나타나고 있고, (b)는 균열선단이 어느정도 명확하게 구분되어지고 있음을 볼 수 있는데, 하중범위가 작을수록 균열길이는 길게 나타나고 굽힘각은 작게 나타나며, 반대로 하중범위가 클수록 균열길이는 작고 굽힘각이 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 고하중일수록 균열길이는 작아도 상대적으로 굽힘이 많이 발생하여 변위가 크게 되고, 저하중일 경우는 굽힘이 작은 대신에 균열길이가 증가하여 변위가 커지게 됨을 의미한다. 또한, 균열이 발생한 시점에서의 수명을 각 하중의 형태별로 정리해보면, 2.5kN일때는 258,146cycle이고, 5kN일때는 3,306cycle이었다. 즉, 동일한 시험편형상에 동일한 균열이 발생하기 위해서는 높은 하중일수록 짧은 시간이 걸리고, 낮은 하중일수록 많은 시간이 걸림을 알 수가 있었다. 그리고, 실제 Strain Gauge을 시험편에 부착하여 2.5kN과 5kN의 하중이 시험편에 적용될 때, 파단이 일어나기까지의 변형율을 시간에 따라 측정함으로써 Strain Energy Density을 각각에 대해서 구할 수 있었다.

4. 유한요소해석

컴퓨터의 능력이 발달함에 따라 유한요소해석도 많은 진전을 하고 있는데, 실제 각 자동차 생산업체에서는 점용접부의 신뢰성 확보 및 내구성 향상을 위한 설계의 필수적 사항으로 이를 적용하여 내구시험결과를 토대로 비교 고찰하여 차체보강의 방안을 마련하고 있는 실정이다. 피로강도의 해석에 대해서는 지금까지 많은 연구자들이 여러 가지 형태의 점용접 이음재에 대해서 수행하여 왔으며, 피로강도를 평가하기 위한 방법으로는 응력집중을 고려한 너깃단 최대응력법, 파괴역학적 매개변수인 응력확대계수 K를 이용한 방법, 그리고, 점용접부 주위의 Strain Energy Density을 이용한 방법이 있다. 그러나, 점용접이음재와 같이 복잡한 하중이 작용하는 경우 최대응력법을 이용한 방법은 해석모델에 사용된 요소의 영향을 받으며, 응력확대계수 K를 이용한 방법은 model, mode2, mode3를 동시에 고려하기가 상당히 어려운 것이 사실이다. 그리고, 위에서 언급한 기존의 3가지 방법들은 모두 피로수명예측에 사용되었던 방법이며, 지금껏 균열의 발생 및 성장에 관한 연구를 위해 위의 방법들이 실제 유한요소법에 사용된 예가 없었다. 그러므로, 균열의 발생 및 성장에 관한 연구를 위해 본 연구에서는 하중조건과 기하학적인 조건에 독립적인 Parameter로서 박판의 대변형을 종합적으로 고려할 수 있는 Strain Energy Density법으로 균열발생위치를 예측하고자 하였는데, 이 방법은 단위체적에 작용하는 모든 하중과 변형의 상황을 에너지 개념을 이용하여 해석하는 것이므로, 특정 하중과 변형형태에 영향을 받지 않고, 실제 현상을 한 가지의 Factor로서 고려할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 이러한 방법을 기본으로 하여 피로균열의 발생과 전파거동을 해석할 수 있는 유한요소모델을 제시하고자 하였다.

4.1 해석모델

해석모델은 Fig. 3과 같이 3차원 사각형 셀 요소를 사용하였고, Strain Energy Density의 발생위치를 정확히 알아내기 위해서 너깃단 주위의 요소를 세밀하게 나누었으며, 상·하판의 요소분할은 공통적이다. 해석에 사용된 Elements와 Nodes의 수는 각각 525개, 548개이다. 또한, 실제 점용접되는 부위는 너깃지름 6mm로 적용하여 일체형으로 요소를 나누었다. 구속조건은 Fig. 3과같이 실제의 피로시험과 동일한 상황을 재현하기 위해서 상판의 25mm까지를 x, y, z축으로 구속하고, 하판의 25mm는 z축만 구속하고 y축으로만 하중을 주었다. 해석은 상용프로그램인 MARC을 사용하였으며, 시험편마다 2.5kN, 5kN의 하중을 y축 방향으로 가하여 해석을 수행하였다.

4.2 Strain Energy Density의 해석결과

시험편에 작용하는 하중이 균열의 발생에 어떠한 영향을 미치는지 해석적으로 고려하기 위하여, 2.5kN, 5kN의 하중을 부여하여 응력해석을 수행하였다. Fig. 4는 인장전단형 시험편에서 각각의 하중크기에 따른 Strain Energy Density의 분포를 나타내고 있는데, 그림에서 보듯이 부하측의 점용접 부 너깃 주위에서 Strain Energy Density의 값이 가장 크게 나타나고 있으며, 인장하중 축에 대하여 대칭으로 분포한다. 피로파괴는 재료의 항복강도 이하의 하중이 반복적으로 계속 작용할 때 국부적으로 슬립밴드가 생성되고, 소성영역이 발생하여 결과적으로 파괴에 이르는 과정을 거치는데, Fig. 4에 나타난 Strain Energy Density가 가장 큰 영역은 국부적으로 소성영역이 발생하여 피로균열이 발생하는 부분이라 가정할 수 있다. 따라서, 인장전단형 시험편에서 피로균열은 부하측의 너깃단에서 가장 먼저 발생함을 예측할 수 있는 것이다. 그러나, Strain Energy Density의 임계값분포는 2.5kN의 경우 선모양을 나타내고 있으며, 5kN의 경우는 짧지만 굽은 형태를 나타내고 있다. 이는 앞서 시험을 통해서 알 수 있었던 결과이다. 그리고, 동일한 시간으로 각각의 하중에 따라서 해석하였을 때, Strain Energy Density의 값은 차이를 나타내고 있는데, 이는 Strain Energy Density의 값이 가장 크게 나타날수록 그만큼 빨리 균열이 발생한다는 것을 알 수 있는 것이다. 실제로 5kN의 경우에 Strain Energy Density의 값이 가장 크게 나타나고 있는 것으로 보아 피로균열이 단수명에서 발생할 것으로 예상할 수 있으며, 실험을 통해서 가장 단수명 조건을 가진다는 것을 확인하였다. 이 사실을 통해 2.5kN을 가했을 때 얻어낸 값이 균열을 발생시킬 수 있는 임계값이라면, 5kN을 가했을 때 얻어낸 값으로 인해 이 경우는 이미 균열이 발생하여 진전하고 있다는 것을 예상할 수 있을 것이다.

5. 결론

고장력 강판의 점용접 시험편으로 피로시험을 수행하고, 유한요소법의 응력해석을 통하여 피로균열 발생에 관한 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 저하중의 경우는 균열선단이 날카롭고 균열 끝부분의 경계가 확실하지 않으나 고하중의 경우는 균열선단이 비교적 완만하여 균열 끝부분의 경계가 육안으로도 확인된다. 이것은 고하중의 경우가 저하중에 비해 시험편의 굽힘이 크게 발생하기 때문으로 판단된다.
2. 실제 시험과 유한요소해석상에서의 균열발생위치가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, Strain Energy Density가 가장 큰 곳에서 균열이 발생할 것이라는 것을 시험을 통하여 확인함으로써 유한요소해석의 타당성을 검증할 수 있었다.
3. 향후과제로는 정립된 Strain Energy Density법을 복잡한 형상이나 다양한 하중이 집중되는 실차체 구조물에 적용하려고 한다.

참고문헌

- [1] 손일선, 오세빈, 배동호 : “304 스테인리스 박판 IB형 점용접이음재의 피로강도 평가 Part : 1 최대주응력에 의한 평가”, 대한용접학회지, 제17권 제6호, (1999), pp. 25-31
- [2] 손일선, 오세빈, 배동호 : “304 스테인리스 박판 IB형 점용접이음재의 피로강도 평가 Part : 2 변형에너지 밀도에 의한 평가”, 대한용접학회지, 제17권 제6호, (1999), pp. 32-37
- [3] B. Pollard : “Spot Welding Characteristics of HSLA Steel for Automotive Applications”, Welding Journal, 1974(8), pp. 343-350
- [4] J. M. Smwhill, JR., J. C. Baker : “Spot weldability of high-strength sheet steels”, Welding Journal, 1980(1), pp. 19-30
- [5] ASME HANDBOOK, Volume 12 : “Fractography”, 1987

Table 1 Chemical properties of base metal [wt%]

C	Mn	P	S	Al	Fe
0.004	0.43	0.072	0.007	0.029	Rem.

Table 2 Mechanical properties of base metal

Yield strength [kg/mm ²]	Tensile strength [kg/mm ²]	Young's modulus [kg/mm ²]	Elongation [%]	Strain hardening exponent
24.8	36.8	20000	38.3	0.24

Table 3 Optimal welding condition

Welding current [A]	Applied force [kgf]	Squeeze time [cycle]	Weld time [cycle]	Hold time [cycle]
9500	300	5cycle	10cycle	12cycle

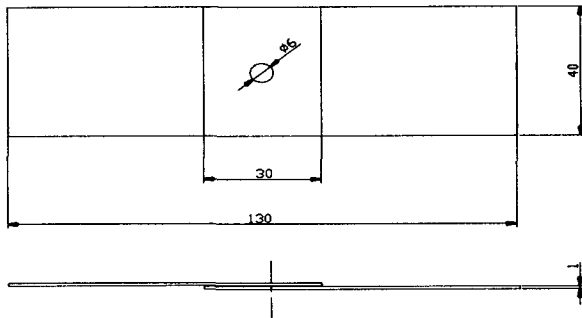


Fig. 1 Specimen Geometry for Fatigue Test

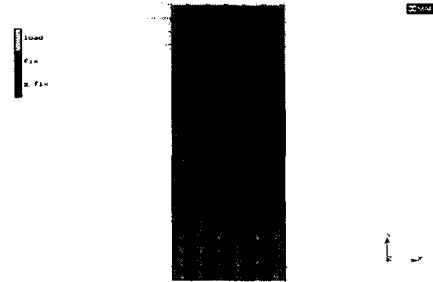
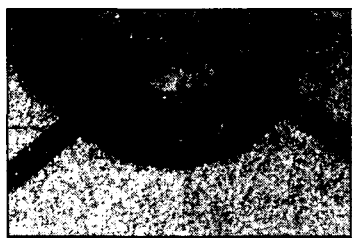


Fig. 3 Mesh Generation for TS type Specimen

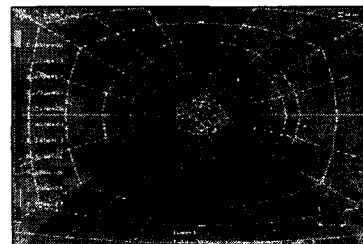


(a) 2.5kN

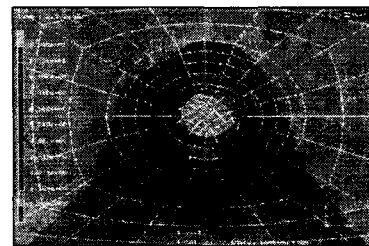


(b) 5kN

Fig. 2 Behavior of Surface Crack for each load range



(a) 2.5kN



(b) 5kN

Fig. 4. Distribution of Strain Energy Density on TS type Specimens