

# 선박구조용강의 플라즈마절단에 의한 잔류응력과 피로균열진전거동

## Residual Stress and Fatigue Crack Growth Behavior of the Ship Structure Steel Cut by Plasma Cutting Technique

\*원천<sup>1</sup>, 김진우<sup>1</sup>, #송정일<sup>1</sup>

\*C. Won<sup>1</sup>, J.W. Kim<sup>1</sup>, #J. I. Song(jisong@changwon.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>창원대학교 기계공학과

Key words : Residual Stress, Fatigue Crack Growth, Plasma Cutting, Grade A, Mild Steel

### 1. 서론

선체구조는 전체적으로 선저판, 외판, 갑판, 격벽 등의 판 부재와 이를 지지하기 위한 소형 늑골부재(frame, 이하 늑골로 칭함), 그리고 다시 이들 늑골을 지지하기 위한 웹(Web) 또는 거더(Girder) 등의 대형늑골부재(이하 웹으로 칭함)로 이루어져 있다. 이들을 조립하기 위해서 현재의 조립공법은 웹의 관통부에 늑골이 부착된 상·하판을 끼워 넣은 후 보강재와 러그재 등으로 웹과 늑골을 고정하는 복잡한 연결조로 이루어져 있다. 최근에는 늑골이 부착된 상·하판을 웹의 전후에서 관통부에 늑골을 끼워 넣은 새로운 조립공법의 적용과 함께, 러그재가 필요하지 않게 되어 종래보다는 조립작업이 다소 단순화되었다곤 하나 효율적인 생산 작업에는 여전히 상당한 지장을 초래하고 있다. 따라서 보강재와 늑골의 위치를 일치시키지 않아도 되는 연구가 진행 중이며, 이를 통해 새로운 보강재 배치법에 적합한 슬롯의 형상으로는 원형 슬롯이 결정되었다.

본 연구는 이러한 새로운 배치법을 실용화시키기 위한 연구로서, 원형 슬롯으로부터 시험편을 채취하여 각종 응력 하에서의 피로특성 및 파괴역학 개념을 도입한 균열 전파 특성 등을 실험적으로 파악하였다. 특히 실험 시편 제작 시 실제의 조건과 동일하게 함으로써 용접 및 절단 시 HAZ(Heat Affect Zone)에서 발생하는 국부 잔류응력에 대한 영향을 고려하였다.

### 2. 잔류응력 측정

본 연구에서는 플라즈마절단에 의한 초기 잔류응력분포 및 정하중 이력후의 잔류응력을 Cutting

Table 1 Plasma cutting condition

| Voltage | Current | Speed      | Efficiency |
|---------|---------|------------|------------|
| 440V    | 220A    | 2500mm/min | 15%        |

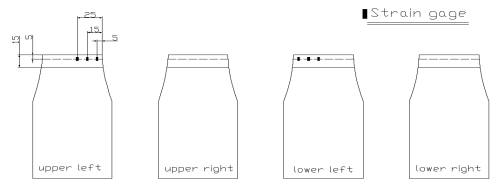


Fig. 1 Strain gauge position and cutting position

법으로 측정을 하고 FEA(Finite Elements analysis)를 통해 실험과 비교하였다.

잔류응력 측정에 사용된 시험편은 선박 구조용 연강인 A 급강을 사용하였고, 절단 조건은 Table 1과 같다. 정적하중에 따른 잔류응력의 변화를 알고자 시편에 각각 0%, 50%, 85%의 항복하중을 이력 후 Fig. 1과 같이 플라즈마 절단부로부터 0, 5mm, 15mm, 25mm 간격으로 측정했다. 잔류응력은 시험편의 길이방향에 대해서만 측정하였다.

FEA에는 상용 Software인 ABAQUS를 사용했다. 먼저 열전도 해석을 수행한 후 그 결과를 이용해 열탄소성 해석을 수행하였다. 해석 모델은 시험편의 대칭성을 고려하여 1/8모델을 사용하였고, 0%, 50%, 85%의 항복하중 이력 후의 잔류응력에 대하여 수행하였다.

잔류응력 측정 및 해석 결과를 보면 절단면에서는 인장응력을 나타내고 있으며, 절단면에서 거리가 멀어질수록 급격히 감소해서 7mm부근에서는 압축응력이 작용하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 측정 전 시편에 가한 인장하중이 높아질수록

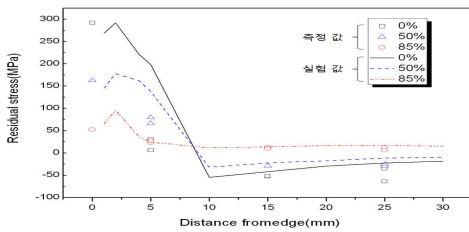


Fig. 2 Residual stress measurement and analyze results

잔류응력은 감소함을 Fig. 2에서 확인 할 수 있다.

### 3. 피로균열진전거동

대부분 구조물의 파괴는 피로하중에 의해 발생되며 피로수명은 재료의 피로균열 진전거동에 의해 좌우되므로 구조물의 피로파괴과정을 해석하고 피로수명을 예측하는 것은 공학적 견지에서 대단히 중요하다.

피로균열 진전거동을 알아보기 위해 슬롯 자유단 주위에 피로균열이 발생하였다는 전제하에 균열진전 속도를 파악하여 파괴역학 정수를 산출하였다. 실험에 사용된 시편은 잔류응력이 내재된 본 시험편 2개와 1/2 축소시험편 3개를 사용했다.

예비피로균열의 하중은 전하중보다 10% 미만의 하중으로 점차 감소시켜 소성역의 발생을 최대한 억제하였다. 최종예비 균열은 약 1mm 정도가 되도록 하였다. 하중비는 -1.0이 되도록 하중을 유지시켰고, 하중 반복 속도는 5Hz인 정현파를 사용했다. 균열길이가 진전할 때의 반복수(N)를 측정하여 a-N곡선을 구하고, ASTM E647-93에 제안된 Secant Method를 사용하여 da/dN을 구하였다. 이 때 균열 길이 측정은 이동식 현미경을 사용하였다. 또한 피로균열진전실험에서 사용된 Paris 식 및 SEN 시편에 대한 Srawley식은 아래와 같다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \times F(\alpha), \alpha = a/W$$

Fig. 3은 균열진전율과 응력확대계수범위로 정리하여 Paris 식의 상수 C와 m값을 구한 것이다.

### 4. 결론

잔류응력을 완화시키는 방법으로 잔류응력이 존재하는 구조물에 인장이나 압축응력을 부가한 후 하중을 제거하면 잔류응력이 감소하는데, 본 실험의 결과도 이와 같은 현상으로 인장하중을

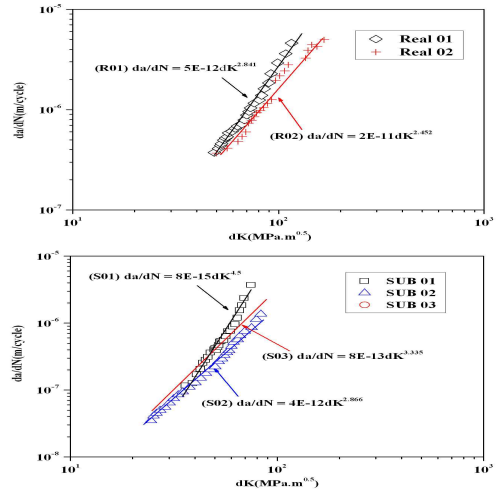


Fig. 3 Fatigue crack propagation test results of origin and reduction specimens

Table 2 Constants of Paris' equation

| Specimen  | C                      | M    |
|-----------|------------------------|------|
| Real size | 1.25×10 <sup>-11</sup> | 2.65 |
| Sub size  | 2.4×10 <sup>-12</sup>  | 3.1  |

가하여 잔류응력이 감소하는 결과가 나타났다.

균열진전 속도(da/dN)과 응력확대계수범위와의 관계에서 정수를 하였다. 잔류응력이 내재된 본 시험편과 축소시험편에 대한 결과의 평균은 Table 2와 같다.

### 후기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO. 2011-0030804). 그리고 본 연구의 저자 중 일부는 두뇌한국 21(BK21)의 지원을 받은 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. H. Koguchi, T.Hino and T. Yada, "Residual stress analysis of Joints of ceramics and metals", ASTM, 1994, pp.116-204
2. E.Pluyette, J.M.Spraul and D.Buisine, "Evaluation of residual stresses in stainless steel cladding", Experimental Mechanics, pp.205-211
3. H.O.Fuchs and R.L.Stephens, "Metal Fatigue in engineering", 1980, John Wiley & Sons