

CT시험편의 Back Face Strain Compliance 평가

김원범

울산과학기술대학교 기계공학부 조선해양전공

Evaluation of a Back Face Strain Compliance of CT specimen

Won Beom Kim

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Faculty of Mechanical Engineering, Ulsan College

요약 용접강구조물에서는 용접비드와 같은 응력집중부가 많이 존재한다. 또한 용접부에서는 용접결함이 발생할 가능성이 많다. 반복적인 피로하중이 응력집중부에 작용하면 응력집중부에서 피로균열이 발생하고, 발생된 균열의 전파에 의해 피로파괴사고를 일으킨다. 따라서 피로파괴사고를 미연에 방지하기 위하여 균열발생수명과 균열전파수명과 같은 피로수명의 파악이 필요하다. 본 연구에서는 피로균열전파특성 연구에 사용되는 컴플라이언스를 도출하였다. 이 컴플라이언스는 피로균열의 자동화 측정에 활용할 수 있다. 본 연구에서는 CT시험편에 대하여 in-house FEM program을 사용하여 컴플라이언스를 계산하였다. 이 계산결과는 저자의 앞선 연구에서 본 프로그램을 사용하여 계산한 J integral의 계산결과와 대비하여 a/W와의 관계를 제시하였다. 그리고 또한 CT시험편 Back Face의 중앙부로부터 위아래 방향의 스트레인 분포에 계산을 실시하였다. 이 분포에서는 중심으로부터 위아래로 갈수록 스트레인이 감소하는 경향을 나타내었다. 이상의 계산과정으로부터 균열진전시험의 자동수행을 위한 컴플라이언스를 얻을 수 있었다. 이것으로부터 CT 시험편의 피로균열진전시험의 자동화에 활용이 가능하게 되었다.

Abstract In welded steel structures, there are many stress concentration sites such as weld beads, and welding defects are likely to occur at the welded parts. When a repeated fatigue load acts on a stress concentration site, fatigue crack occurs and propagates, leading to fatigue fracture. Therefore, it is necessary to understand fatigue life, crack initiation life, and crack propagation life in order to prevent fatigue failure. In this study, a compliance method was derived for use in the study of fatigue crack propagation characteristics. This compliance can be used for automated measurement of fatigue cracks. The compliance was calculated using an in-house FEM program for a CT specimen. The results of this calculation are presented in relation to a/W and compared with calculation results using the J integral and a program from a previous study. In addition, the strain distribution in the upward and downward directions was calculated from the center of the back face of the CT specimen. In this distribution, the strain tended to decrease from the center to the top and bottom. The compliance method was achieved from these calculations and can be used for automatic execution of crack propagation tests.

Keywords : Fracture Mechanics, CT specimen, Back Face Strain, Compliance, Crack

1. 서론

대형 용접강구조물의 경우, 예를 들어 선박이나 해양 플랫폼 및 건설기계등 용접기법을 사용하여 제작하는 구조물의 경우, 용접의 특성상 국부적인 열의 투입에 의한

잔류응력 및 용접결함을 피할 수 없다. 선박의 경우, 사고결과 분석을 보면 피로강도 부족에 의한 사고가 빈번히 발생하며 그 원인의 상당수가 구조적 응력집중부와 용접결함을 기점으로 하여 발생하였음을 볼 수 있다[1]. 따라서 피로강도의 관점으로 볼 때, 피로강도를 만족하

*Corresponding Author : Won Beom Kim(Ulsan College)

Tel: +82-52-279-3135 email: wbkim@uc.ac.kr

Received August 11, 2016

Revised (1st November 24, 2016, 2nd November 29, 2016)

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

기 위하여 설계단계에서 여러 시험들을 거쳐 피로강도상의 보증을 위한 시험과 검토를 수행하게 된다. 이와 같은 피로강도평가를 위해서는 피로균열의 발생수명과 전파수명을 평가한다. 피로강도의 평가를 위하여 사용강제에 의한 시험편을 제작하여 피로강도시험을 실시하게 된다. 한편, 균열전파시험의 경우 중앙관통슬릿을 가진 CCT 시험편이나 편측에 균열을 가진 CT 시험편을 많이 사용하게 된다. 피로균열발생시험에서는 균열이 발생한 시점을 발생수명으로 간주하며, 피로균열전파시험에서는 균열의 전파수명을 파악하여 $da/dN - \Delta K$ 의 관계로 나타낸다. 균열전파시험은 기본적으로는 목시관찰에 의하여 균열의 길이나 균열의 직선적인 전파의 여부, 앞뒷면에서의 균열길이의 동등여부 등을 관찰한다[2].

한편 균열진전시험에서는 컴플라이언스(Compliance)를 활용한 시험이 통상적으로 자주 사용된다[3-6]. 실험적으로는 컴플라이언스를 구하기 위한 방법으로, Crack-Mouth-Opening-Displacement(CMOD)와 Back Face Strain(BFS)가 사용된다. Crack-Mouth-Opening-Displacement(CMOD)의 측정을 위해서는 통상의 파괴역학형 COD 게이지를 사용하며 ASTM E399[7]으로부터 참조가능하다. BFS 방법에 대해서는 철강재료용으로 사용하는 온도보상형 스트레인게이지를 사용한다. CT 시험편의 Back Face(BF)에 스트레인게이지의 중심과 CT 시험편의 중심을 맞추어 붙이고 하중을 가하여 발생하는 스트레인을 파악할 수 있다. 이것으로부터 구한 컴플라이언스를 이용하면 균열전파시험을 자동화할 수 있다.

BFS의 유용성은 다음과 같다. 피로강도 연구에서 균열의 성장을 조사하여 성장과 관련한 특성을 명확히 하는 것은 중요한 부분이다. 이를 위하여 균열을 측정하고 그 특성을 파악한다. 이와 같은 과정 중에서 균열의 길이를 자동적으로 파악할 수 있는 실험방법인 BFS를 이용하여 구한 컴플라이언스로부터 균열길이를 특정할 수 있다. 이를 위해서는 균열의 길이와 컴플라이언스와의 관계가 명확히 제시되어 있어야 자동화한 균열의 파악이 가능하다.

이를 위하여, 해당 강재에 대하여 미리 같은 종류의 시험편으로 균열전파시험을 실시하여 컴플라이언스를 확보해두고, 이후 전파시험에서는 목시관찰이 아닌 컴플라이언스를 이용하여 균열길이를 나타낼 수 있다.

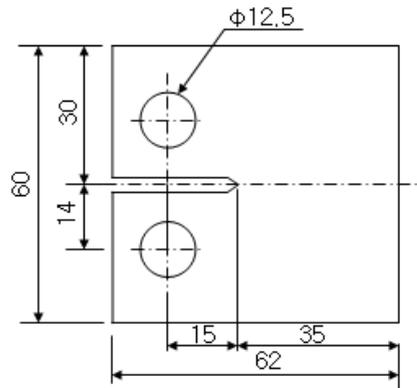


Fig. 1. Configuration of CT specimen

본 연구에서는 이와 같이 컴플라이언스를 활용한 균열전파시험을 위해 컴플라이언스를 작성하였다. 즉, CT 시험편에 대하여 in-house FEM program[8]을 사용하여 시험편을 모델링하고, FEM 해석을 실시하여 수치해석적으로 BFS를 계산하고, 계산된 BFS으로부터 본 CT 시험편의 컴플라이언스를 확보하였다.

따라서 동종의 CT 시험편에 대해 균열전파시험시 본 연구결과로부터 확보된 컴플라이언스를 사용하여 균열전파시험에 활용될 수 있도록 하였다.

또한 도출된 컴플라이언스와 J 적분을 비교하여 컴플라이언스와 J 적분 및 균열길이 a/W 사이의 관계를 그림으로 나타내어 이들의 관계를 명확히 하였다.

2. BFS 평가를 위한 수치해석

2.1 BFS의 확보

본 연구에서는 수치해석적인 방법을 통한 BFS를 평가하기 위하여 FEM[8]을 사용하여 수치해석을 실시하였다.

본 해석에서는 ASTM에서 제안되어져 있는 CT 시험편[7]을 대상으로 하여 모델링을 실시하고 균열길이 a/W 에 따른 BFS를 평가하였다. 해석에 사용한 CT 시험편의 형상은 다음 Fig. 1과 같다.

위의 CT 시험편으로 FEM을 이용한 수치해석을 하기 위하여, 앞선 연구[8]에서 J 적분해석을 위하여 실시한 것과 동일하게 메쉬 분할하였다. Fig. 2는 본 해석을 위하여 실시한 CT 시험편의 반쪽모델(half model)에 대한 그림을 나타내고 있다.

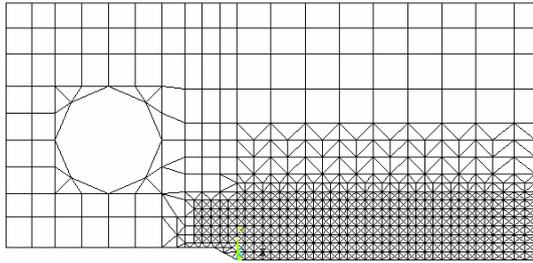


Fig. 2. Half model of CT specimen for calculation

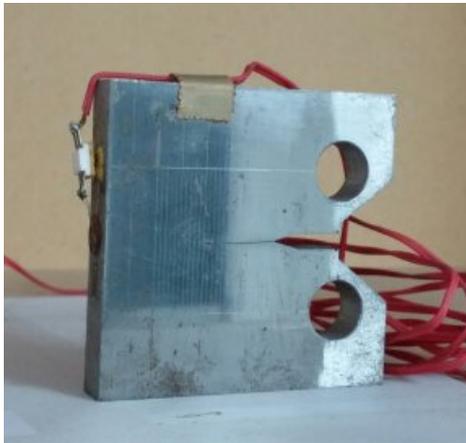


Fig. 3. Configuration of back face strain gauge adhesion

균열이 지나가는 부분에 대해서는 조밀한 분할을 실시하였다. 조밀한 부분의 메쉬사이즈는 참고문헌을 참조하여 실시하였다. 즉, Riddell et al.[6]는 특이점에서의 전형적인 요소크기를 0.0325W로 실시하였다. 또한 그들은 상기 논문에서, 4배 더 조밀한 요소로 계산을 실시하였으나 실제적으로 동일한 결과를 얻었다고 하였다.

본 연구에서는 균열면에서의 요소크기를 0.01W로 실시하여 Riddell et al.의 요소 대비 3.25배 조밀한 요소로 계산하였다. 이 시험편에 대한 FEM해석을 위하여 859개의 노드와 1681개의 요소를 사용하여 해석을 실시하였다. 먼저 Fig. 2의 시험편 모델의 최우측 외측 요소에서 BFS를 구하였고, 또한 최우측 외측 노드에서 δ 를 구하여 ϵ 를 구하고 비교를 실시하였다. 스트레인게이지 5mm에 상당하는 편측 2.5mm까지의 스트레인 값은 균열길이가 짧은 경우 거의 일정하였다.

다만, 균열길이가 길어짐에 따라 약간의 차이는 발생하였다. 즉, 스트레인의 구배가 급해진다. 이것은 Fig. 4에서도 확인이 가능하다.

다음 Fig. 3은 BFS의 실험적 측정을 위한 스트레인게이지의 BF에 대한 부착사진의 예를 나타내고 있다.

CT시험편과 같은 균열전과특성의 파악을 위한 피로 균열진전시험에서 균열의 측정은 기본적으로는 이동식 현미경의 광학적 수단에 의하여 균열의 관찰과 균열길이 측정을 실시하고, 시험편 앞뒷면의 길이의 차이와 같은 편차라든지 균열전과경로의 이탈이나 균열의 분기등 균열진전시험결과의 부정확성을 가져올 영향인자들에 대한 관찰의 수단으로도 이용된다.

그러나 기본적으로는 균열길이의 측정은 컴플라이언스에 의한 측정이 바람직한 것으로 알려져 있다.

2.2 실험적 BFS의 평가법

균열전과실험으로부터 컴플라이언스에 의한 균열길이의 실험적으로 측정시, 측정 수순은 다음과 같다. 하중에 대한 로드셀 출력(P)과 클립게이지나 BFS 게이지출력(δ)으로 부터의 컴플라이언스 A^* ($= \delta/P$)를 다음과 같이 구할 수 있다.

균열길이를 별도의 대기중 피로실험으로부터 구한 a/W - A^* 의 관계로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a/W = C_0 + C_1 A^* + C_2 A^{*2} + C_3 A^{*3} + C_4 A^{*4} + C_5 A^{*5} \quad (1)$$

여기서, a 는 균열길이, W 는 시험편의 폭이다.

2.3 본 연구에서의 컴플라이언스 A^* 의 계산

본 연구에서 컴플라이언스 A^* 의 계산은 다음과 같이 실시하였다[6].

$$A^* = \epsilon EBW/P \quad (2)$$

여기서 ϵ : back face strain
 E: Young's Modulus
 B: thickness
 P: pin load
 W: width

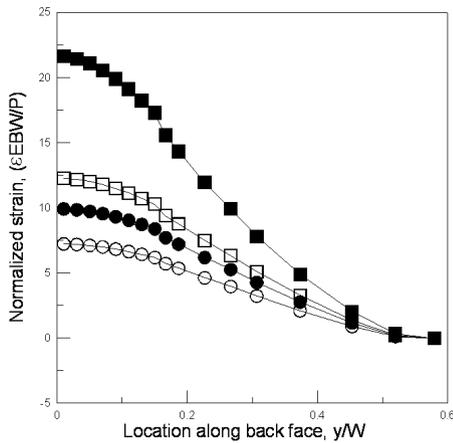


Fig. 4. Strain variation along back face of CT specimen

본 연구에서는 균열길이의 W 에 대한 비 a/W 에 따라 CT시험편의 BF에서 BFS를 계산하였다. BFS의 계산은 균열면 근처의 CT시험편의 중앙면의 BF에서 하나의 요소에서 계산하였다.

Fig. 4에서 ○, ●, □와 ■는 각각 균열길이 a 가 21mm, 24mm, 26mm 그리고 31mm일때의 무차원화한 스트레인값을 나타낸다.

그림은 CT시험편의 BF의 종방향의 스트레인의 분포를 계산하여 중심으로부터 멀어짐에 따른 스트레인의 변화를 나타내었다. 종축을 y 방향의 스트레인의 크기로 하고 횡축을 CT시험편의 중심으로부터의 거리를 W 로 나눈 값으로 하여 중심으로부터의 스트레인의 분포를 나타내었다.

각각 균열길이 a 가 21, 24, 26, 31mm일때의 a/W 에 대해 FEM에 의한 BFS 부착장소에서의 y 방향의 스트레인을 해석하고 이로부터 A^* 를 계산하였다.

그림에서 균열길이가 길어질수록, 그리고 중심으로부터 멀어질수록 BFS의 구배가 급하게 감소됨을 알 수 있다. 그림에서 y/W 가 0인 점은 시험편에서는 균열이 지나가는 중심선의 연장선상에서의 시험편의 뒷면에 해당한다.

2.4 컴플라이언스의 계산과 정도 비교

균열길이에 따른 컴플라이언스 A^* 식 (2)에 따라 계산하고 a/W 와의 관계를 다음 Fig. 5에 ●로 나타내었다.

그 다음으로 본 계산결과의 정도를 확인하기 위하여 다른 연구자의 결과와 비교를 실시하였다.

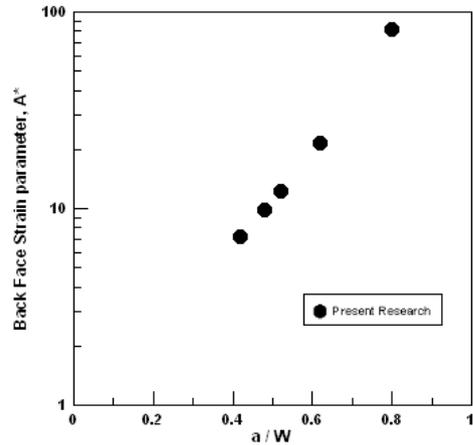


Fig. 5. Calculation results of a/W vs. back face strain parameter

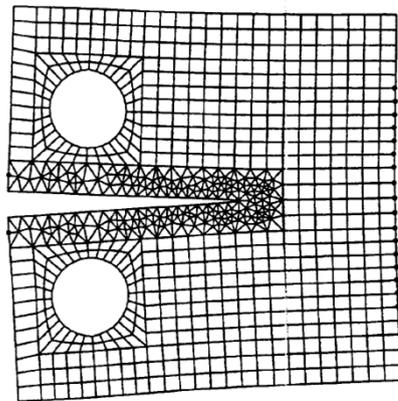


Fig. 6. Example of finite element mesh

Riddell et al.[6]은 CT시험편에 대하여 a/W 가 0.1에서 0.9까지에 대하여 응력해석을 실시하였으며 균열주위에 singular quarter point element를 배치하고 각각의 a/W 에 대하여 위의 요소를 배치한 모델로부터 응력해석을 실시하였다. 대부분의 상용 FEM 프로그램에서도 이와 같은 요소를 a/W 별로 배치하여, 각각의 균열길이에 대해 응력해석을 실시한다.

이에 비해, 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 균열면에서 균열 크기에 따라 경계조건을 변경하여 연속적인 J 적분 해석이 가능하다. Fig. 7은 본 연구의 결과와 타 연구자의 계산결과를 같이 나타낸 그림이다. 본 그림에서 Deans et al.[4]의 데이터를 curve fitting해서 a/W 가 각각 0.42, 0.48, 0.52, 0.62인 점에서 비교하면 각각 9.1, 8.5, 7.2, 8.3%의 편차를 나타내고 있다. 따라서 본 계산

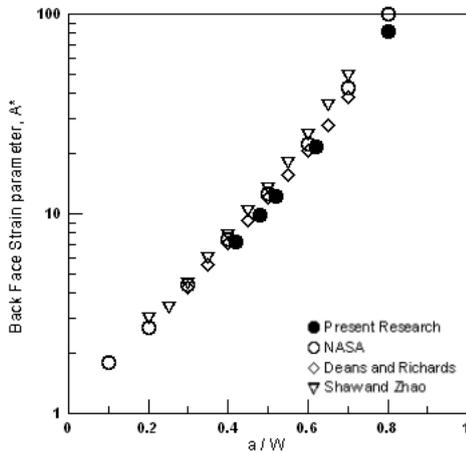


Fig. 7. Comparison of calculation results of a/W vs. back face strain parameter

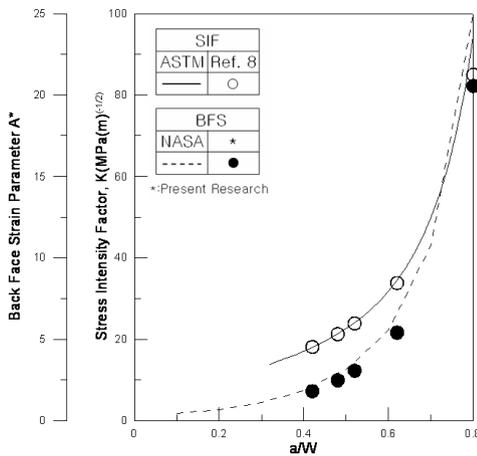


Fig. 8. Comparison of Back Face Strain Parameter vs. a/W and J integral vs. a/W

결과는 전체적으로 약간 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

2.5 CT 시험편에서 a/W 에 따른 컴플라이언스와 J 적분의 비교

본 연구에서는 저자의 앞선 연구[8]와 연계하여 CT 시험편의 J 적분 결과와 컴플라이언스와의 관계를 a/W 와 대비하여 Fig. 8에 나타내었다. 즉, Fig. 8에서는 균열 길이에 따른 J 적분 값에서의 컴플라이언스 A^* 의 값을 a/W 와 대비하여 함께 읽을 수 있도록 나타내었다.

3. BFS의 계산결과의 비교 및 고찰

본 연구에서는 CT 시험편에 대한 BFS를 계산하여 a/W 에 따른 A^* 를 대비하여 나타내었다.

이 결과는 타 연구자들의 해석결과와 대비하여 일치하는 계산결과를 나타내었고, 본 해석모델의 매쉬 사이즈에 의한 해석으로 충분한 정도의 균열전파특성을 파악할 수 있음을 알 수 있었으며, 균열전파특성의 컴플라이언스의 활용에 의한 파악이 가능하게 되었다. 또한 해석 프로그램으로서 in-house FEM program을 사용하여 수행하였으며, 상용의 프로그램보다 보다 손쉽게 균열의 모델링과 J 적분해석이 가능하여 BFS와 a/W 및 J 적분의 상관관계를 손쉽게 파악이 가능하게 되었다. 이와 같은 과정으로부터 얻어진 컴플라이언스를 활용하여 CT 시험편의 균열전파실험시 컴플라이언스를 이용한 균열진전거동의 파악이 가능하게 되었다.

4. 결론

이상에서 CT시험편의 컴플라이언스에 관한 연구를 실시하였으며, 이상으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) CT 시험편에 대하여 in-house FEM program을 사용하여 CT 시험편의 BF에서의 strain 분포를 계산하였다.
- 2) 본 계산결과로부터 CT 시험편의 컴플라이언스를 얻을 수 있었으며, CT 시험편의 피로시험의 자동화에 이용할 수 있게 되었다.
- 3) 본 in-house FEM program을 이용하여 CT시험편이 아닌 타 형상의 시험편에 대해서도 컴플라이언스를 얻을 수 있게 되었으며, 피로강도의 연구에 기여할 수 있게 되었다.

References

[1] J. U. Park, G. B. An, "Fracture Toughness of Thick Steel Plate for Ship Building", *Journal of KWJS*, vol. 25, no. 4, pp. 15-19, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.5781/kwjs.2007.25.4.015>

[2] W. B. Kim, "Corrosion Fatigue Crack Propagation Behaviour of TMCP Steel Plate at Ballast Tank of Ship

Structure under the condition of Cathodic Overprotection", *Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 13, no. 6, pp. 2465-2471, 2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.6.2465>

- [3] J. C. Newman, Y. Yamada, M. A. James, "Back-face strain compliance relation for compact specimens for wide range in crack lengths", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, pp. 2707-2711, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.07.001>
- [4] W. F. Deans, C. E. Richards, "A Simple and Sensitive Methods of Monitoring Crack and Load in Compact Fracture Mechanics Specimens using Strain Gages", *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 6, no. 3, pp. 147-154, 1978.
- [5] W. J. D. Shaw, W. Zhao, "Back Face Strain Calibration for Crack Length Measurement", *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 22, no. 6, pp. 512-516, 1994.
DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE11854J>
- [6] W. T. Riddell, R. S. Piascik, "A Back Face Strain Compliance Expression for the Compact Tension Specimen", NASA/TM-1998-208453, 1998.
- [7] ASTM E399, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, PA, 1990.
- [8] W. B. Kim, "Evaluation of the J integral of a CT specimen by FEM", *Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 15, no. 11, pp. 6440-6445, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.11.6440>

김 원 범(Won Beom Kim)

[정회원]



- 1997년 6월 : Hiroshima대학교 대학원 공학연구과 조선구조공학 전공 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 울산과학대학교 기계공학부 조선해양전공 교수

<관심분야>

파괴역학, 부식피로강도, 용접구조강도, 선체 및 기자재 도면검사