

# 용접 잔류응력을 고려한 강구조물의 피로강도평가

## A Numerical Estimation of Fatigue Strength of Welded Steel Structures with Residual Stresses

정 흥 진\* · 유 병 찬\*\*

Chung, Heung-Jin · Yoo, Byoung-Chan

---

### ABSTRACT

According to previous research, welding-induced residual stresses in steel structures can significantly affect the fatigue behaviour. Usually, high tensile residual stresses up to the yield strength are conservatively assumed at the weld toes. This conservative assumption can result in misleading fatigue assessments. The welding-induced residual stresses need be known in advance for a reliable fatigue assessment, which becomes possible to an increasing extent by numerical welding simulation.

In this study, a fatigue Analysis technique for steel structures with welding-induced residual stress is presented. First, We calculate the history of temperature according with welding process. Secondly, residual stress with a welding thermal history was evaluated by non-linear thermal stress analysis and lastly, fatigue strength is estimated with modified Goodman equation which can consider the effect of mean stress level.

**Keywords:** Residual Stress, Fatigue Analysis, Thermal Analysis, Steel Structures

---

### 1. 서 론

강구조물의 장대화, 세장화 및 설계합리화에 따라 고강도강재(High Strength Steel)의 사용이 점차 늘고 있다. 고강도강재를 적용하여 높은 허용응력으로 교량구조의 합리화 및 경량화를 시킬 수 있고, 얇은 판두께도 적용이 가능하여 기계가공 및 용접 작업이 용이 하고, 비파괴 검사의 정밀도 향상을 가져 올 수 있다. 일반 강재의 경우 부재력의 증가에 따라 두께를 키워야 하는데 이 경우, 용접성 저하나 피로강도의 저하 등의 현상이 일반적으로 발생한다. 따라서 일반강에 비해 강도, 인성, 용접성, 가공성, 부식성 등 일정성능을 향상 시킨 고성능강(High Performance Steel)을 개발하였고, 그 중에서도 고강도강재는 일반강에 비해 인장강도를 향상시킨 강을 총칭하는 것이다. 고강도강은 판 두께가 두꺼워지면 강도를 확보하기 어렵고, 반대로 강도를 확보하기 위해서는 합금원소의 첨가가 필요하기 때문에, 용접성을 해치는 결과를 초래 할 수 밖에 없었다. 최근에는 판두께가 40mm 이상으로 두꺼워져도 설계 기준강도를 낮출 필요가 없고, 저탄소 당량으로서 용접성이 우수하며, 또 내진성도 우수한 강재인 TMCP(Thermo Mechanical Control Process) 강재를 개발하여 사용하게 되었다. TMCP강재의 경우 항복점이 기존의 강재에 비해 상당히 크고, 용접부의 경도는 감소한

---

\* 정희원 · 전주대학교 토목환경공학과 부교수 Email: hjchung@jj.ac.kr

\*\* 학생희원 · 전주대학교 토목환경공학과 석사과정 Email: chany1120@nate.com

다고 알려지고 있다.

한편 고강도강으로 된 후판을 용접하는 과정에서 발생하는 용접잔류응력과 이에 따른 피로성능의 저하에 대한 연구는 몇몇 실험적 연구를 제외하고는 거의 없는 실정이며 고강도강의 적용성을 떨어뜨리는 요인이 되어왔다. 본 연구에서는 고강도강의 용접잔류응력에 대한 피로강도저하현상을 수치적으로 평가하기 위하여 먼저 (1) 유한요소법을 이용하여 용접과정에 따른 온도의 변화를 구하고 (2) 용접과정에 따라 달라지는 온도 변화에 의해 최종적으로 남게 되는 용접잔류응력을 구하였다. 그리고 (3) 이 용접잔류응력이 구조물의 피로 수명 및 피로강도에 미치는 영향을 정량적으로 계산하였다. 이 과정을 통하여 고강도강의 일종인 TMCP강의 용접특성 및 잔류응력특성을 파악하였고 피로설계시 고려해야 할 용접잔류응력의 영향을 확인하였다.

피로수명을 평가하는 기법은 응력-수명방법, 변형률-수명방법, 파괴역학적 방법 등 크게 세가지로 나눌 수 있다. 응력-수명방법은 정량화된 S-N 선도를 이용하는 방법으로 계산이 간단하고, 장수명 및 일정진폭이력에 적합한 방법이다. 변형률-수명방법은 초기균열의 진전은 정확히 예측할 수 있으나 균열의 전파수명의 계산에는 사용하기가 어렵다. 파괴역학적 방법은 유한요소해석과 같은 해석기법을 통하여 선형화된 파괴역학 기법을 사용, 균열의 진전을 모사하는 방법이다. 본 연구에서는 계산된 용접잔류응력을 일반적인 응력-수명 방법에 평균응력 또는 응력비로 고려하는 기법(수정된 Goodman선도)을 사용하여 구조물의 피로수명을 평가하였다. 본 연구에서 사용한 용접 잔류응력 해석기법 및 해석조건의 타당성을 검증하기 위하여 기존 연구결과와 본 연구의 예비해석 결과를 비교하였다.

## 2. 용접 과정의 열전달 해석

본 연구에서 사용된 용접해석기법의 정확성을 검증하기 위하여 (1) 기존의 연구결과와의 비교 및 (2) TMCP강과 SM570강재의 용접잔류응력비교를 실시하였다. 용접부위의 열전달해석에서는 열원인 용접아크에 의한 유입에너지가 정확히 정의되어야 하는데 이 아크 입열은 온도 분포와 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)의 크기에 영향을 미치게 되므로 해석시 중요한 인자이다. 용접 아크를 모델링하는 방법은 열유입 형태에 따라 (1)가우스 표면 분포 모델 (Gaussian surface flux distribution model), (2)이중타원체 분포 모델 (double ellipsoidal power density distribution model), (3)균일 분포 모델(Ramp heat input model) 등이 있다. 본 연구에서는 간단하지만 비교적 충분한 정확도를 갖고 있다고 판단되는 균일분포모델을 사용하였다. 균일분포모델에 사용되는 열유속의 계산식은 다음과 같다.

$$q = \frac{\eta EI}{bl} \quad (1)$$

이때  $q$ 는 표면 열유속( $W/mm^2$ )이고,  $\eta$ 는 아크 효율,  $E$ 는 아크 볼트(V),  $I$ 는 아크 전류(A),  $b$ 는 비드의 폭(mm),  $l$ 은 용접방향 입열면적의 길이(mm)이다. 한편 균일분포모델에서 용접 속도와 초기 Ramp 시간이 전체 입력하중의 약 20%가 실험결과에서 잘 일치한다는 점을 고려하여 그림 1과 같은 시간 및 용접길이에 따른 열유속 분포를 결정하였다. 한편 정확한 용접과정해석을 위해 상변화를 고려해야 한다. 고온의 영향을 받는 강재는 고체에서 액체상태로 상태가 변하는 상변화를 겪게 되고, 이 과정에서 유입되는 에너지는 상변화에 영향을 미칠 뿐 직접적으로 온도 상승에 미치지 않는다. 이때 저장되는 에너지를 잠열(latent heat)이라하고 이 영향을 고려해 주기 위하여 엔탈피(Enthalpy)를 사용하였다. 그림 2는 해석에 사용된 물성치의 온도에 대한 변화이다.

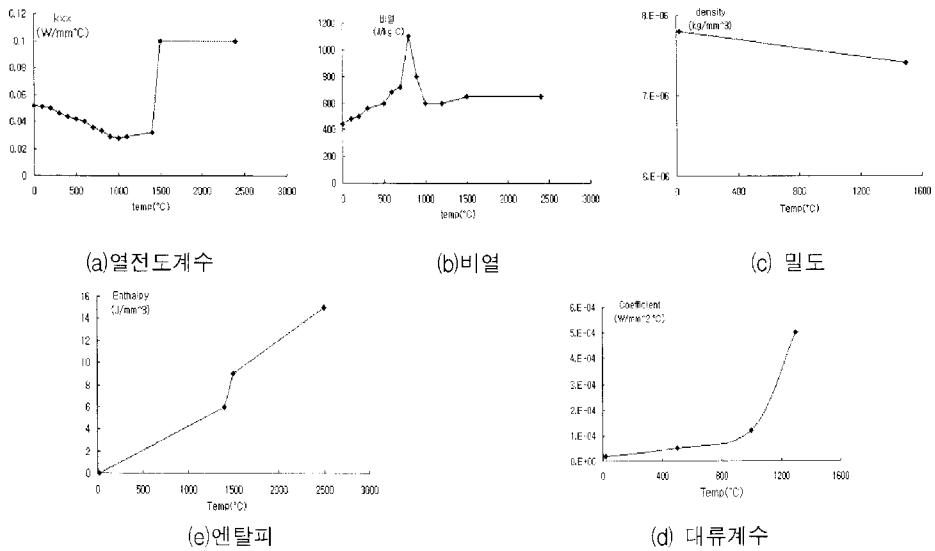


그림 2 열전달해석에 사용한 물성치

해석 프로그램은 범용해석프로그램인 ANSYS를 사용하였으며 먼저 용접 해석조건 및 해석 방법 검증을 위하여 기존 연구결과와 비교하는 예비해석 수행하였다. 기존의 자료의 해석방법에 대한 검증과 입력하는 물성치의 적절성을 검증을 위하여 기존의 연구결과와 동일한 유한요소모델을 생성하고 열전달 및 열응력 해석을 실시하였다. 그림 3에 시간에 따른 온도변화 및 온도분포를 나타내었다.

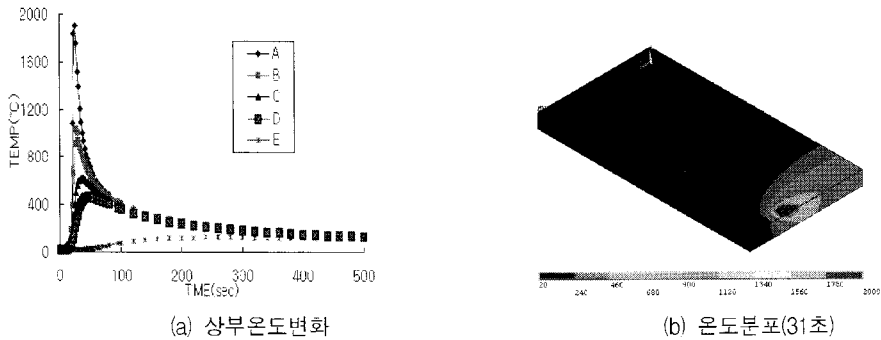


그림 3 예비해석 결과

### 3. 비선형 열응력해석

용접과정은 열전달현상과 이에 따른 열응력발생이라는 두가지 물리적 현상이 동시에 일어나는 열-구조 복합문제(Coupled Field Problem)이다. 따라서 열전달해석의 결과값을 온도하중으로 이용하는 순차적 해석방법(Sequential Method)으로 열-구조 복합문제를 해석하였다. 본 연구에서는 먼저 두께에 따른 잔류응력을 검토하였고 용접 잔류응력에 특히 취약하다고 알려진 T형 접합부를 해석하였다.

### 3.1 두께에 따른 잔류응력의 변화

고강도강의 두께에 따른 용접 잔류응력 분포를 알아보고자 각각 10mm, 20mm, 30mm, 40mm의 두께를 가지는 TMCP강을 해석하였다. 그림 17은 열응력 해석결과 최종시간 500초에서의 용접선방향의 잔류응력을 보여주고 있다.

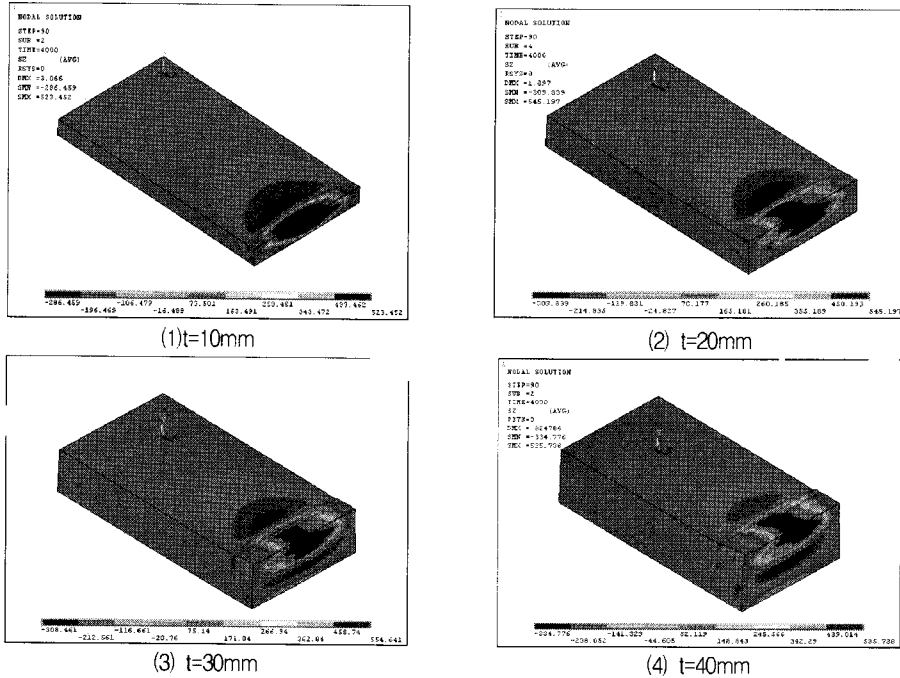


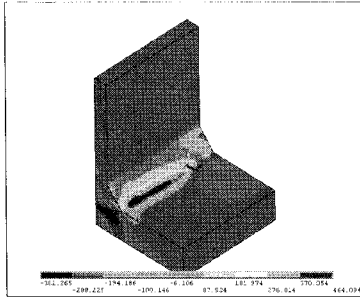
그림 4 TMCP강의 두께에 따른 용접선 방향의 용접 잔류응력( $\sigma_x$ )

그림 4에서 보는 바와 같이 두께가 커질수록 표면의 인장응력에서 내부에서는 압축응력이 작용하고 있어 두께에 따른 차이를 볼 수 있다. 그러나 피로 수명의 단기가 되는 용접 표면의 응력은 두께에 상관없이 530Mpa로 비슷한 값을 보이고 있어, 두께에 따른 피로 수명에 대한 영향은 없는 것으로 판단된다.

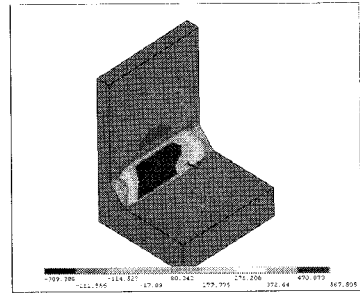
### 3.2 고강도강의 T형 용접부 잔류응력 해석

다음으로 T형 용접 접합부의 용접 접합부의 잔류응력을 평가하고자 하였다. 모델형상 및 치수는 다음과 같다. 용접에 사용한 물성치는 예비해석과 같은 TMCP 물성치를 사용하였으며, 그 결과 용접부의 온도 분포는 예비해석과 비슷한 분포를 보였다. 용접부의 용접 잔류응력 해석 결과는 그림 5와 같다.

그림 5(a)는 용접선 직각방향의 용접 잔류응력을 보여주고 있다. 피로 균열의 원인이 되는 표면에서 인장 응력이 맞대기 용접보다 크게 나오는 것을 확인할 수 있었고, 그 값은 약 464Mpa이었다. 그림 5(b)에서는 T형접합부 또한 맞대기 용접과 마찬가지로 용접선 방향의 잔류 응력( $\sigma_x$ )이 큰 값을 보였고 그 값은 567MPa 이었다. 이는 허용응력을 넘는 값으로 피로 수명 평가시에 고려를 해 주어야 한다.



(a) 용접선 직각방향의 용접 잔류응력( $\sigma_x$ )



(b) 용접선 방향의 용접 잔류응력( $\sigma_z$ )

그림 5 TMCP강 T형 용접 접합부의 잔류응력

#### 4. 잔류응력을 고려한 피로해석

강구조의 피로강도-수명관계를 정량화 하기 위하여 피로강도와 피로수명과의 관계를 나타낸 것이 이 S-N 선도(응력-수명 선도)는 기본적으로 완전교반응력가정이므로 반복하중에 의한 평균응력이 0이다. 따라서 잔류응력이 있는 경우 이 S-N 선도를 이용하려면 Haigh 선도를 이용하여 보정해 주어야 한다. Haigh 선도를 그리기 위해서는 수많은 실험이 필요하므로 몇 가지 관계식이 개발되어 사용되고 있다. 도로교시방서에 의하면 S-N 선도의 이용시 평균응력이나 이에 다른 응력비를 고려하지 않게 되었으나 용접잔류응력이 큰 용접부의 경우에는 고려하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 본 연구에서는 Haigh 선도에서 일반적으로 사용되는 Goodman의 곡선을 채용하였고 이를 이용하여 S-N 선도에 사용되는 응력변동범위를 수정 Goodman 식 (Modified Goodman equation)을 이용하여 변환하였다. 수정 Goodman 식은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_{mean}}{S_u} = 1 \quad (2)$$

이 때  $\sigma_a$ 는 응력 진폭(stress amplitude)이고,  $\sigma_{mean}$ 는 평균응력 (mean stress),  $S_e$ 는 피로한도,  $S_u$ 는 극한응력이다. 여기서 응력 진폭과 평균응력은 다음과 같이 구한다.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (4)$$

수정 Goodman 식에서 고려하고 있는 용접 잔류응력을 이용하여 식 (2)을 다시 쓰면

$$\frac{\sigma_{a-res}}{S_e} + \frac{\sigma_{mean} + \sigma_{res}}{S_u} = 1 \quad (5)$$

이 된다. 기존 연구 및 실험결과를 참조하면, 표준 시방서에서 권장하는 반복 횟수인 200만회에서 하중 범위( $S_e$ )는 FCAW 용접의 경우 약 144MPa이었고, 또한 TMCP강의 극한 응력은 약 630MPa이었다.

다음은 T형 용접접합부 해석결과를 이용하여 피로수명의 변화를 간략히 계산한 것이다. 피로설계지침에 의하면 T형 용접 접합부의  $2 \times 10^5$  회 피로강도는 100MPa이다. 그리고 용접잔류응력 해석결과 용접 선단부의

최대 인장잔류응력은 464MPa이다. 사하중에 의한 평균응력을 무시하고 규정된 피로강도에 대하여 반복응력을 받고 있다고 가정하면 식 (5)에 의하여 수정된 응력변동범위는 약 379.5MPa으로 규정된 피로강도를 만족하지 못한다. 본 연구에서 얻어진 결과에 의하면 용접잔류응력이 피로수명에 미치는 영향은 무시할 수 없다는 기존의 연구결과들과 일치하는 것을 알 수 있다. 특히 잔류응력이 비교적 많이 발생하는 고강도강의 경우에는 특별한 처리가 필요하다.

## 5. 결과 검토 및 향후 연구

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 고강도강의 용접시 발생하는 용접잔류응력을 강판의 두께 및 용접 형태별로 구하였고 이 결과를 이용하여 용접잔류응력이 피로수명에 미치는 영향을 정량적으로 구하였다. 고강도강의 용접부 피로강도를 확보하기 위해서는 용접잔류응력을 평균응력으로 고려하여 피로성능을 평가하여야 한다. 많은 비용이 소요되는 실험적 방법을 보완하기 위하여 유한요소법을 이용하여 고강도강재의 용접 과정에서 발생하는 용접잔류응력을 평가하고 이 결과를 이용하여 강구조물의 피로 잔류수명을 예측하는 기법을 연구하였다. 본 연구에서 사용된 기법은 고강도강 뿐만 아니라 일반 구조용강재의 용접 잔류응력에 의한 피로수명수정에 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 이 방법이 실무에 적용되기 위해서는 먼저 다양한 구조형식에 대한 실험을 통하여 해석결과를 검증하여야 한다.

## 6. 참고문헌

- 김석 외(2001), 후판 부분용입 다층용접의 잔류응력 및 파괴해석, 대한용접학회지, 19(6), p.636
- 김종락, 박양희(2003), SM490A TMC 후판강재의소재 및 용접부 특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 15(3), p.331
- 김지훈, 신중계 외(2001), ANSYS를 이용한 GMAW의 열탄소성모델링, www.tsne.co.kr,
- 김현성 외 (2000), 유한요소법을 이용한 필렛용접 이음부의 잔류응력분포, 한국강구조학회논문집, 12(2), p.197
- 심용래(1997), 유한요소법을 이용한 용접부의 잔류응력, 변형 및 파괴해석, 대한용접학회지, 15(1), p15
- 이하성, 강동명(1994), 용접부의 인장 및 압축잔류응력에 관한 피로균열 전파거동, 한국산업안전학회지, 9(3), p.13
- 조재병외(2006), 모재의 두께와 용접치수에 따른 핏팅용접부의 강도, 한국강구조학회논문집, 18(3) p.331
- Bae, D.H., Sohn, I.S., Hong J.K(2002), Assessing the Effects of Residual Stresses on the Fatigue Strength of Spot Welds, *Welding Research*, 18-S
- Lee, H. Y., Biglari, F.(2002), Treatment of Residual Stress in Life Assessment Procedures, *Journal of Testing Evaluation*
- Noel P. O'Dowd etc,(2003), Stress Intensity Factors Due to Residual Stresses in T-Plate Welds, *ASME*
- Fricke, W.(2005), Effects of Residual Stresses on the Fatigue Behavior of Welded Steel Structures, *Mat.-wiss. Werkstoffech*, 36, pp.642-649