

구조응력기반 마스터 피로 선도를 이용한 하중 비전달형 십자 필렛 용접조인트의 피로예측

곽시영^{*,†}

*사이버설계그룹 한국생산기술연구원(로봇틱스 및 가상공학과 과학기술연합대학원대학교)

Fatigue Life Prediction of Non-Load-Carrying Cruciform Welded Joint using Master S-N Curve based on Structural Stress Approach

Si-Young Kwak^{*,†}

*e-Design Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Korea
(Robotics&Virtual Engineering, University of Science and Technology)

†Corresponding author : vlvwlv@kitech.re.kr

(Received December 1, 2015 ; Revised December 14, 2015 ; Accepted December 16, 2015)

Abstract

Welding process is of importance to assemble products or structures, but also the process is structural weakness due to stress concentration in welding joint. The fatigue design of welded joint requires time & labor consuming fatigue test because the fatigue life is various according to the depth of joint, joint type and load type etc. In fatigue design codes, they guide to classify welding joints with their shape(BS7608, IIW Documents) and provide fatigue assessment information. In terms of numerical method for fatigue analysis, it is also difficult to decide the stress peak in joint because of mesh sensitivity which means that stress value is varies with element type or size on stress concentration zone. Hot-spot method is used generally, but Battelle of United States proposed Master S-N Curve based on structural stresses converted by mechanical equilibrium theory. In this research, we extracted master S-N curve from Battelle's fatigue test DB including test data of various welding joints to apply on Non-Load-Carrying cruciform Joint. Comparing fatigue results between the case of using normal stress and case of structural stress cor the cruciform Joint, The suggested Battelle method showed successive results.

Key Words : Arc weld, Fatigue, Structural stress, Cruciform welded joint

1. 서 론

용접은 제품의 크기를 불문하고 기계/선박 조립 및 토목/건축에서 아주 중요한 제조공정이지만 또한 구조물을 취약하게 만드는 원인이 되고 있다. 이런 원인은 용접 부위에서의 응력 집중 현상으로 야기 되므로 실제 용접 구조물의 피로예측을 위해서 조인트의 접합방식 및 두께에 따른 수많은 피로시험이 요구된다. 실제 제조 현장의 설계단계에서는 용접조인트의 피로수명을 예측하기 위해 BS 7608와 같은 코드를 이용해 조인트타

입에 따른 클래스를 분류하여 피로수명을 제시하고, IIW(International Institute of Welding)의 피로설계 가이드를 이용해 좀 더 다양한 조인트와 재질에 대해 카툰기반의 피로정보를 제공하고 있다.

CAE 기술의 발전과 더불어 유한요소법기반 구조해석을 통한 피로평가가 이루어지고 있으나 해석요소(Analysis element)의 크기에 따라 응력값이 변하는 등 여전히 많은 연구를 필요로 하고 있다. 미국의 바텔연구조는 용접부의 피로해석을 위해 구조응력(Structural Stress)과 마스터 피로선도(Mastre S-N curve)을 제안 하였는데 해석 요소의 타입 및 크기에 따른 응력

결과의 민감성은 구조응력을 이용하고, 각종 조인트에 대한 피로시험 데이터로부터 조인트별 집중응력을 구조응력으로 환산하여 마스터 곡선을 구하였다¹⁾. 이를 이용하면 조인트의 종류와 두께에 상관없이 구조응력과 하나의 마스터 곡선으로 원하는 용접조인트의 피로수명을 예측 할 수 있다.

구조 응력을 적용한 용접 구조물의 피로예측은 국내에서 조선분야를 중심으로 여러분야에서 연구가 이루어졌으나²⁻⁴⁾ 기존의 논문이 구조 응력을 적용하고 실험결과와 비교하는 등의 연구인 반면 “조인트의 형상과 두께가 달라서 공칭응력(Nominal stress)이 다르더라도 응력 집중부의 구조응력(Structural stress)을 적용하면 마스터 피로 선도를 이용하여 피로수명이 가능하다”는 관점에서의 기술은 부족한 것이 사실이다.

본 연구에서는 웹상에서 원하는 용접조인트타입에 대해 바텔 피로 시험DB에서 유사조인트타입의 시험데이터를 추출하여 마스터 피로선도를 제공하고 원하는 조인트의 구조응력을 구할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 이를 이용해서 하중 비전달형 십자 필렛 용접 조인트에 대해 적용해 보았다. 십자형 용접 조인트에 대해 바텔 피로 시험DB에서 가장 유사한 조건의 피로시험데이터로부터 얻은 마스터 피로곡선에 공칭응력을 적용하고 형상과 두께 하중상태가 다른 용접 조인트의 피로시험 데이터로부터 추출한 마스터 피로 곡선에 구조응력을 적용하여 구한 피로수명 예측결과를 비교 분석하였다.

2. 구조응력

2.1 구조응력

고전적으로 구조물은 평형역학방정식을 이용하여 설계되어 왔으며 기하학적 불연속점에서는 응력 집중현상을 고려하기 위해 응력 집중계수를 적용하였다. 근래에는 유한요소기법(Finite Element Method)과 같이 최소 포텐셜 에너지 또는 가상일 등 에너지 방정식을 이용한 구조해석이 대중화되면서 엔지니어들이 구조물의 응력설계에 접근하기 쉽고 정확해졌지만 응력 집중부위에서는 적용한 해석요소타입 및 크기에 따라 응력 값이 변하는 요소의 민감도(Element Sensitivity) 문제로 인하여 응력집중부의 응력피크치의 결정이 쉽지 않다¹⁾.

구조응력(Structural stress)은 응력 집중부에서의 수치해석결과를 인장/압축 및 굽힘 같은 역학적 평형방정식 개념으로 변환한 응력 값이다. 플랜트 분야 등에서는 응력 집중부에서의 구조설계에 필요한 응력 피크

치를 고려하기 위해 구조응력개념을 활용하는 응력선형화(Stress linearization) 기법을 적용해 왔으며 ASME Sec. VIII 등 많은 구조물 설계코드에서 채용하고 있다⁵⁾.

2.2 용접부에서의 피로 예측

용접조인트부는 응력이 집중되며 이러한 부위에서의 응력 피크치가 포함된 수치해석 결과 값을 그대로 시험에서 구한 피로 S-N선도에 적용할 경우 매우 보수적인 결과를 초래해 왔다. 즉 피로예측에서는 위험하지만 실제 구조물은 전혀 문제가 없이 작동하는 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위해 조선 분야에서는 Hot-spot stress가 가장 많이 적용되고 있으며²⁾ 자동차 등의 분야에서는 각 자동차 메이커마다 실험과의 correlation을 통해 수정 factor를 적용하거나 피로해석 전용 틀에서 제공하는 구조응력 개념과 유사하게 응력변환을 통해 얻은 값을 적용하기도 한다⁶⁾.

바텔연구소는 좀 더 역학적인 기초이론에 기반을 둔 구조응력계산법을 유도하였고 이를 이용하는 마스터 피로선도를 제안하였다¹⁾. 바텔구조응력을 적용한 피로예측 기법은 80년대부터 조선분야를 시작으로 적용해왔으며 현재 ASME Sec. VIII Div. 2, API 579/ASME FFS-1 and BV(Bureau Veritas)에서 Fatigue Guidance로 채택하였다.

2.3 구조응력의 계산

바텔에서 제안하는 기법을 이해하기 위해서는 공칭응력, 구조응력, 등가구조응력 세가지의 응력타입을 이해해야 한다. 우선 공칭응력(Nominal stress)은 주어진 외부하중에 대해 용접조인트부의 면적성분을 고려한 응력으로 축방향 응력식($\sigma = F/A$) 또는 굽힘응력식으로부터 구해진다. 일반적으로 공칭응력은 응력 집중부에서 일정거리 떨어진 영역의 F/A 개념으로 응력집중부의 응력을 포함하고 있지 않다.

구조응력(Structural stress)은 응력집중부의 응력 피크치가 포함된 응력값을 축방향과 굽힘으로 분리하여 나눈 응력값으로 일반적인 변환식은 복잡하나 개념적으로 표현하면 해당조인트의 구조응력집중계수(SCF, Structural Stress Concentration Factor)를 구하여 공칭응력에 곱하는 값이다^{1,7)}.

$$\begin{aligned} \text{구조 응력}(\sigma_s) &= \text{공칭응력} * \text{SCF} \\ &= \text{축방향응력} + \text{굽힘응력} \quad (1) \\ &= \sigma_m + \sigma_b \end{aligned}$$

등가구조응력(Equivalent structural stress)은 상 기 구조응력에 인장 또는 굽힘과 같은 하중조건을 보정한 것으로 굽힘비(Bending ratio) 함수로 나누어진다^{1,7)}. 굽힘비는 $\sigma_b/(\sigma_b+\sigma_m)$ 로 전체 응력에서 굽힘응력의 비율이다. 공칭응력을 등가구조응력으로 표현하면 공칭응력상에서 시험한 인장피로시험데이터와 굽힘피로 시험데이터가 하나로 통합되어 마스터 피로선도를 그리는 기반이 된다.

3. Master 선도 활용 피로예측절차

3.1 Master 선도의 작성

Fig. 1과 같이 용접조인트 타입, 두께 및 하중타입이 다양하며 모든 경우에 대한 피로시험 데이터를 확보하는 것은 불가능하다. 하지만, 만약 현재 보유한 다양한 두께에 대한 시험 결과를 두께를 파라미터로 보정해 놓은 마스터 피로선도가 있다면 임의의 두께에 대해서도 기존데이터를 근거로 피로수명이 가능할 것이다. 즉 두께, 조인트형상, 하중조건에 대해 보정을 해준다면 임의의 조인트에 대해 시험을 새로 하지 않고서도 마스터피로선도에서 피로수명을 예측하는 개념이다.

다양한 두께, 조인트, 하중조건에 대해 공칭응력으로 표현된 피로시험 데이터는 매우 큰산포도를 가지고 있지만 판두께, 조인트 타입, 하중타입을 고려한 등가 구조응력으로 S-N 선도를 그리면 데이터의 산포가 줄어들어 반복적인 피로시험을 마스터 피로선도로 대체하는 것이 가능하게 된다.

구조응력을 고려하면 용접 조인트의 응력 집중부에서의 응력을 정량적으로 구할 수 있게 되므로 조인트타입에 따른 집중응력 차이를 보정하는 역할을 하므로 결과적으로 조인트 타입에 관계없이 다양한 피로시험데이터를 참조하여 마스터 S-N 피로선도를 그릴 수 있다. 또한 2절에서 설명하였지만 인장 또는 굽힘과 같은 하중조건을 보정한 등가구조응력을 적용하면 인장, 굽힘 모든 데이터의 참조가 가능해진다. 결과적으로 활용 가능

한 시험데이터를 보다 많이 확보함으로써 통계적으로 피로수명 예측 정확도를 향상시킨다. 또한 복잡한 형상의 구조물에서 만일 유한요소 기법을 활용하여 응력해석을 할 때 응력 결과를 구조응력으로 변환하여 적용하면 해석요소의 크기와 형상에 민감하지 않으므로 피로 예측의 신뢰성이 향상된다¹⁾.

3.2 피로예측절차

본 연구에서는 바텔에서 구축한 다양한 용접 조인트 타입들에 대한 피로 시험DB로부터 최적의 마스터 곡선을 추출하고 해당 용접 조인트의 구조응력값을 계산하는 프로그램을 웹상에서 개발하였다. 개발된 프로그램은 웹상에 게시되어 있으므로 누구나 접근하여 사용할 수 있다⁷⁾.

개발된 프로그램을 이용한 피로예측 절차는 다음과 같다.

- 1) 기본 데이터 선택
 - 용접 공정, 재질, 시험조건 선택
- 2)조인트 타입 선택
 - 해당 조인트를 검색한다.
 - 구조응력을 기반을 할 경우는 생략 가능
- 3) 해당 데이터 추출
 - 보유한 피로시험 DB로부터 상기 조건에 부합하는 데이터 추출
- 4) 응력 종류 선택
 - 피로예측을 공칭응력, 구조응력, 등가구조응력으로 나누어서 진행 할 수 있다.
- 5) 선택한 응력 종류에 Master S-N선도 작성
- 6) 응력 종류에 따른 파라미터 선택
 - 두께보정, 구조응력 집중계수, 굽힘비 입력
- 7) 피로수명 예측
 - 기대수명에 대한 설계허용하중 또는 주어진 설계 하중에 대한 기대수명을 통계적 마스터 피로선도를 활용하여 계산

4. 용접 셀구조물의 피로예측

4.1 적용모델 및 피로 해석 조건

Fig. 2는 일반적인 선체의 제작에 사용되는 박판(셀, shell) 용접 구조물을 보여주고 있다.

본 논문에서 적용하려는 셀구조 용접 조인트는 Fig. 3(a)와 같으며 하중방향과 수직인 방향의 용접구조물은 하중이 전달되지 않는 하중 비전달형 십자용접 조인트이다. Fig. 3(b)는 판 두께, 각장 등 피로 예측 대상 조인트의 형상 파라미터를 보여준다.

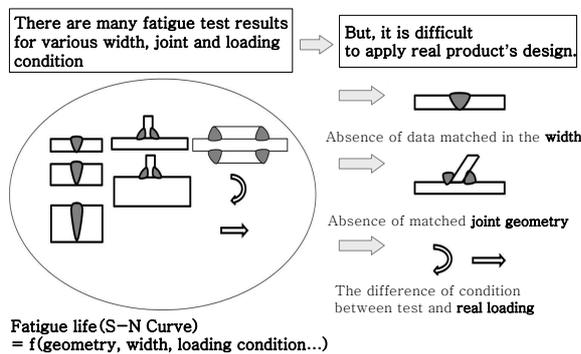


Fig. 1 Application limit of fatigue test data



Fig. 2 A Sample welded shell structure

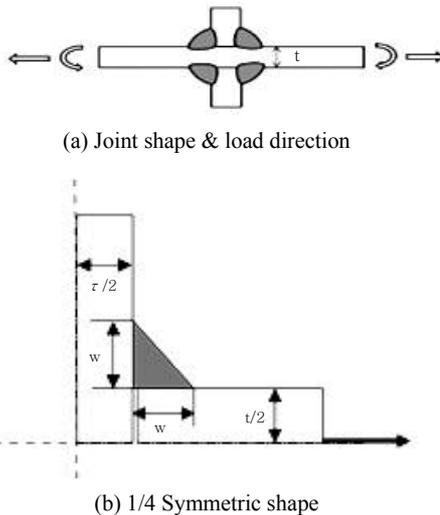


Fig. 3 Non-Load-Carrying cruciform joint and its dimension parameters

반복인장하중을 받는 두께(t, τ)가 10mm, 각장(w)가 6mm인 비하중 전달형 십자 용접부재를 구조용강으로 제작하려고 할 때 다음조건에 대한 피로수명예측을 수행하였다.

- 1) 기대피로수명을 500,000 cycle 확보하려면 적절한 설계하중 허용응력범위는?
- 2) 설계허용응력범위가 200 MPa 이라면 이 때 구조물의 기대 피로수명은?

4.2 공칭응력에서의 피로수명 예측

바텔에서 제공하는 피로 DB로부터 아래의 조건을 만족하는 시험데이터를 추출하면 398개가 추출되며 이를 이용하여 통계적 기법의 마스터 피로선도를 그렸다 (Fig. 4).

- ① Weld Process : Fusion Weld
- ② Failure Mode : Toe Failure
- ③ Material : Steel/Cabon and alloy

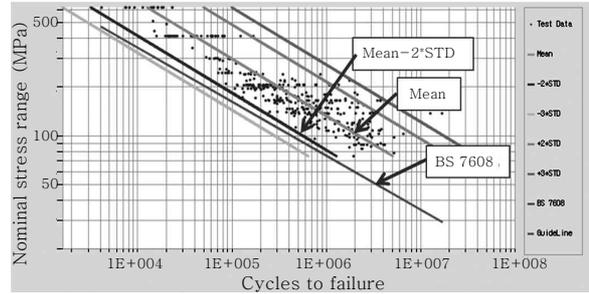


Fig. 4 Master S-N curve (based on nominal stress)

- ④ Test Condition : In Air
- ⑤ Joint Type : Non-Load-Carrying cruciform
- ⑥ Load Type : Tension

Fig. 4를 활용해서 피로조건에 대한 피로수명을 계산하면 다음과 같다. 계산은 통계적으로 선도의 “Mean-2*STD”(2 standard deviation)을 기준으로 하였다.

- 1) 기대피로수명을 500,000 cycle 확보하려면 적절한 설계허용응력범위는? \Rightarrow 128.9 MPa
- 2) 설계허용응력범위가 200 MPa 이라면 이 때 구조물의 피로수명은? \Rightarrow 131,414 cycle

4.3 구조응력에서의 피로수명

본 논문의 목적인 구조응력의 적용을 위해서는 2.1절의 식 (1)과 같이 구조응력집중계수를 구하여야 한다. 3.2절에서 언급한 프로그램⁷⁾에서는 Fig. 5와 같이 여러가지 대표적인 용접조인트에 대해 구조응력집중계수를 구하는 툴을 제공한다. 여기서 조인트를 선택하고 두께, 하중 등의 조건을 넣으면 구조응력 집중계수가 구해진다. 본 조인트의 경우는 1.34 이다.

3.1절에서 언급한 바와 같이 구조응력의 경우는 조인트 타입에 대한 영향을 보정하였으므로 ⑤번 조건을 다음과 같이 변경하여 피로 DB를 추출하였다.

“⑤ Joint Type : 모든 plate 타입”

추출된 데이터 개수는 882개로 늘어나면 500,000 cycle 수명을 위한 허용응력범위는 135.5MPa, 설계허용응력 200MPa 에서는 155,521 cycle의 기대피로수명이 예측 되었다.

등가구조응력(Equivalent structural stress) 적용에서는 인장 또는 굽힘과 같은 하중조건을 보정한 등가구조응력을 구하여 적용함으로써 하중타입과 상관없이 마스터 S-N 선도를 구할 수 있으므로 하중타입 선택시 “Tension과 bending”을 모두 선택하였다.

Calculating concentration factor for structural stress

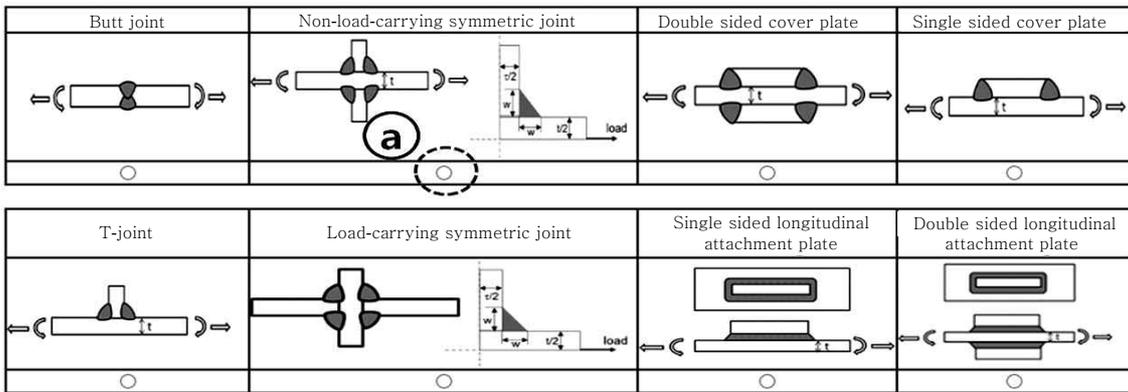


Fig. 5 Calculation of structural stress parameter for typical welding joints

“⑥ Load Type: Tension and bending”

추출된 데이터는 1018개로 늘어나며 통계적으로 더욱 정확한 마스터 선도를 제공한다. 2.1절에서 설명한 바와 같이 등가구조응력은 하중상태에서의 굽힘비가 필요하며 이 값은 Fig. 5에서 제공하는 계산치를 이용하여 계산할 수 있다⁷⁾. 500,000 cycle 수명을 위한 허용응력범위는 136.2MPa, 설계허용응력 200MPa 에서는 157,893 cycle의 피로수명이 예측 되었다. 각각의 응력타입에 대한 피로수명 값은 다음절에서 정리하여 비교 분석하였다.

4.4 응력 종류에 따른 피로수명 비교 분석

Table 1에 각각의 응력타입에서의 피로수명을 정리하였다. 현재의 조인트타입에 대한 결과에서 응력 타입에 따라 398개~1018개 까지 다른 개수의 시험데이터를 참조하였는데 피로수명 결과값이 유사 하였다. 더욱이 등가 구조응력은 현재 인장 및 굽힘시험 데이터를 함께 사용했음에도 불구하고 설계허용응력에서 5% 차이를 가지는 유사한 값을 도출하였다. 즉 하중타입에 대한 보정이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

이런 결과는 만일 조인트타입 또는 하중타입의 특수성으로 인하여 다른 설계 코드에서 피로수명데이터를 참조하기 어렵거나 시험이 힘든 경우에 등가구조응력을 적용함으로써 기존 시험자료를 마스터 선도화하여 피로수명을 예측할 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

본 연구에서는 하중 비전달형 십자 필렛용접조인트에 대해 공칭응력과 구조응력을 기반으로 하는 마스터 피로선도를 활용하여 피로수명을 예측하였다.

1) 주어진 십자형 용접조인트와 유사한 경우의 시험데이터만을 참조하여 구한 공칭응력의 경우에는 주어진 피로하중조건에서 허용응력 128MPa, 기대수명 131,141cycle 로 예측되었다.

2) 십자형 용접 조인트뿐만 아니라 모든 판재 용접 조인트의 피로시험 데이터를 활용한 구조응력의 경우에는 피로 허용응력 135.5 MPa, 기대수명 155,521cycle 로 예측되었고 공칭응력에 비해 응력은 5.1%, 기대피로수명은 20%의 차이를 보였다.

3) 초기 주어진 하중조건은 인장조건이나 모든 조인트타입, 인장, 굽힘 하중타입 모든 데이터를 이용하는 등가구조응력에서는 허용응력 136.2MPa, 기대수명 157,893 cycle 로 단순 구조응력과 큰 차이가 없었으며 공칭응력과도 응력은 5.6% 피로수명은 20%의 차이를 보였다.

4) 구조응력을 적용하면 전혀 다른 조인트타입, 하중타입의 데이터를 사용하여도 원하는 조인트의 피로수명을 예측하는데 적용이 가능함을 보여 주고 있다.

References

1. Jeongkyun Hong, Development and Application of the Battelle Structural Stress Method for Fatigue Evaluation of Welded Automotive Structures, *Journal of KWJS*, 30-2 (2012), 126-134 (in Korean)
2. Seongmin Kim, Youngnam Kim, Seunghyun Lee and Myunghyun Kim, Fatigue Assessment of Load-carrying Asymmetric Double Bevel Cruciform Welded Joints using Structural Stress Approach, *Journal of KWJS*, 30-6 (2012), 572-577 (in Korean)
3. Dongil Ryu et al., Master Fatigue Curve of SS400 Material through Equivalent Structural Stress, *Journal of KSME*, 38-4 (2014), 287-288 (in Korean)
4. Chulsu Kim et al., Fatigue Analysis of Welding Bogie Frames for Rolling Stocks Using The equilibrium-

- equivalent structural stress method, *The Korean Society for Railway Preceeding* (2010.07), 1243-1248 (in Korean)
5. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, *Section VIII, Div.2*(2007)
 6. MSC Nastran User Guide, chapter 4 Grid Point Force Balance Results, *UNIVERSAL ANALYTICS, INC.*
 7. Program & User manual, Web site, <http://www.je-joup.kr/db/processdb.aspx>