

핫스팟 응력 해석을 위한 일반 지침

용접강도연구위원회

General Guide for Hot Spot Stress Analysis

Commission of Design, Analyses and Structural Strength of Welded Structures

요 약

본 일반 지침은 용접 이음부나 구조물의 피로강도 평가에 사용되는 기준응력 계산에 관한 내용으로 핫스팟 응력(Hot Spot Stress, 이하 HSS)이라고 칭하는 응력 평가용 해석 기술 및 관련 내용을 다룬다. 국제용접협회 (IIW; International Institute of Welding) 발간 지침서의 주요내용에 대한 간략한 소개와 함께 대한용접학회 용접강도연구위원회의 Round-Robin 시험 결과를 바탕으로 유한요소 응력해석 기반 용접 이음부의 HSS 평가 방법에 관한 내용을 정리하였다.

1. 서 론

기존의 용접 구조물에 대한 피로해석은 공칭응력 (nominal stress)을 기준으로 하는 조인트 형상별 분류기준을 바탕으로 실시되었다. 이러한 공칭응력을 이

용한 접근 방법은 특정 구조물의 실제 치수영향을 고려하지 못하는 단점이 있으며, 이음부 형상이 복잡한 경우는 공칭응력을 평가하기가 거의 불가능하고, 응력해석을 실시하더라도 결과의 해석에 많은 어려움이 존재한다.

상기의 이유로, 응력평가 기준위치로서 균열발생 예상 취약 부위(Hot Spot, 이하 핫스팟)를 이용하는 방법이 대두되었는데, 이 방법의 특징은 용접 이음부의 치수 및 형상을 고려한 응력평가가 가능하다는 것이며, 핫스팟의 응력을 비교적 체계적으로 평가할 수 있는 장점을 갖는다.

핫스팟 방법은 해양구조물에 사용되는 관형 구조물의 용접부 피로해석을 위해 처음 개발되었으며, 미국석유협회 (API; American Petroleum Institute), 미국용접학회 (AWS; American Welding Society), 프랑스 선급협회 (BV; Bureau Veritas) 등에 의해 피로

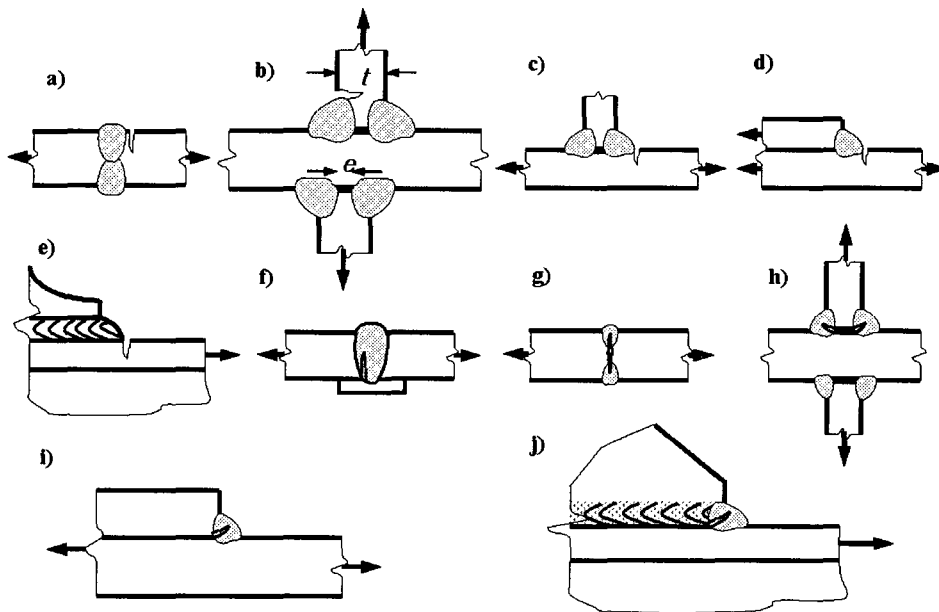


Fig. 1 Various locations of crack propagation in welded joints

설계 규정이 만들어졌고, 그 후 모든 종류의 판재 구조물에 까지 확대 적용되었다.

ENV 1993-1-1(Eurocode 3)에서 처음으로 기하학적 응력 해석방법을 설계코드로 규정하였으나 다소 미흡하여, 후에 IIW에 의하여 새로운 핫스팟 방법을 포함한 4가지 방법을 제시되었다.

2. IIW HSS 기준

핫스팟 방법은 다음의 용접부에 적용된다.

- 반복 주응력이 주로 용접토우에 수직하게 작용하는 경우
- 균열이 용접 토우에서 발생하는 경우 (Fig. 1(a)~(e) 참조)

균열이 용접 루트부에서 발생하여 용착 금속을 따라 전파하는 경우에는 적용 불가하며(Fig. 1(f)~(i) 참조), 이 경우 균열이 용착금속 표면으로 전파하기 전까지는 육안으로 균열을 발견할 수 없기 때문에 적절한 설계를 위해서는 피해야한다. 또한 길이 방향의 하중을 받는 연속 용접부에는 적용할 수 없으며, 이 경우에는 공칭응력 평가법이 타당하다.

판재 표면이 2 축 상태인 경우, 용접 토우에 45°~90° 수직한 주응력 평가에 적용 가능하며, 그 외의 주응력은 필요하면 공칭응력 방법을 이용한 평행 용접부에 대한 피로선도 규정을 이용하면 된다.

2.1 핫스팟의 종류

핫스팟은 Fig. 2와 같이 두 종류로 크게 분류할 수 있다.

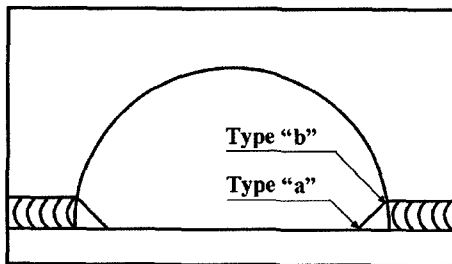


Fig. 2 Examples of hot spot types

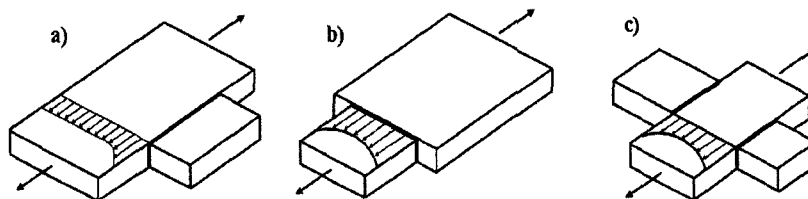


Fig. 3 Various details with Type "b" hot spots at a plate edge

- Type "a" : 판재의 표면에 용접부가 있는 경우
- Type "b" : 판재의 edge에 용접부가 있는 경우

Fig. 3에 판재 단부에 용접부가 있는 type "b" 핫스팟의 다양한 용접 형상을 나타내었으며, 이와 같은 용접부는 높은 구조적 응력집중에 의하여 낮은 피로강도를 보인다. 따라서 가능하면 둥근 조인트 형상 및 완만한 코너 반경을 갖는 것이 바람직하다.

2.2 Type "a" 핫스팟 의 구조적 응력(Structural stress)의 정의

핫스팟이란 피로균열의 발생이 예상되는 용접토우 등의 취약부를 말하며, 핫스팟 방법은 핫스팟에서의 구조적 응력, 즉 HSS의 응력진폭을 기준으로 한다. Fig. 4에서 보이듯이 구조적 응력 (σ_s)는 판재 표면에 작용하는 막응력 (σ_m)과 판재 굽힘 응력 (σ_b)의 합이다.

그러나 Fig. 5와 같이 용접부 선단에는 용접토우와 같은 국부 노치에 의하여 판재 두께 방향으로 비선형적인 응력분포가 형성된다. 기본적으로 핫스팟 방법은 설계자가 실제 용접 토우 형상을 알 수 없기 때문에, 비선형적인 응력 (σ_{nlp})를 제외한 구조적 응력이며, 노치의 영향은 실험에 의해 구해진 핫스팟 S-N 선도에 포함되어 있다.

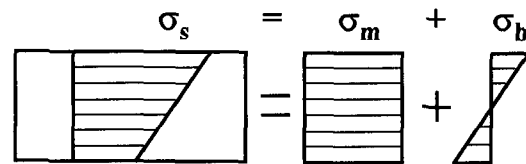


Fig. 4 Structural stress as the sum of membrane and shell bending stresses on the surface of a plate or shell

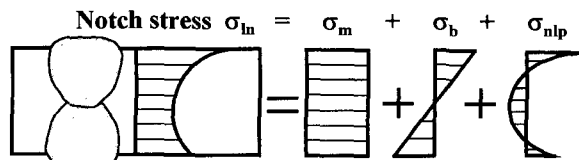


Fig. 5 Actual non-linear stress distribution across the plate thickness at a Type "a" hot spot

2.3 구조적 HSS 결정을 위한 실험적 근사방법

2.3.1 Type "a" 핫스팟 의 경우

Fig. 6에 Type "a" 핫스팟에 대한 용접부 두께 방향의 응력분포를 나타내고 있다. 용접 토우로부터 0.4t (t: 판 두께) 떨어진 위치의 응력은 거의 선형적으로 분포하며, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 외삽법을 이용하여 구조적 HSS를 평가한다.

Type "a" 핫스팟에 있어서 대부분의 경우, 구조적 응력과 변형률은 용접 토우에 접근함에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 피로 시험편이나 기타 시험편에 대하여 스트레인게이지를 이용한 계측을 통하여 구한 HSS 값은 Fig. 7의 선형 외삽법을 이용하기에 충분하며, 두께의 스트레인게이지를 용접 토우로부터 0.4t 및 1.0t 위치에 부착한 후 선형 외삽법을 이용하여 구조적 변형률을 구할 수 있다. 이 외삽 위치는 유한요소 응력해석을 통한 HSS 결정 위치와 같으며, 이 외삽 위치에서 측정된 값은 응력해석 결과와 비교하여 보수적인 결과를 준다.

용접 토우로부터 0.4t 및 1.0t 떨어진 위치에 스트레인게이지를 부착한 경우, 구조적 핫스팟 변형률은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon_{hs} = 1.67\epsilon_A - 0.67\epsilon_B \tag{1}$$

빔 구조의 웹 위 에 부착된 플랜지 등, 강성이 큰

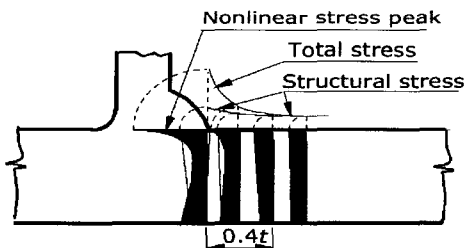


Fig. 6 Development of the stress distribution when the cross section approaches the weld toe

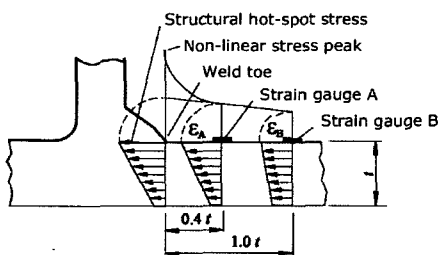


Fig. 7 Linear extrapolation of the measured strains to the weld toe in order to approximate the structural hot spot strain

탄성 기초위에 있는 판재가 하중을 받는 경우, 판재의 구조적 불연속부에서의 응력 비선형성은 용접 토우에 근접함에 따라 급격히 증가하며, 이와 같은 경우 선형 외삽법은 실제보다 작은 결과 값을 보인다. 따라서 이와 같은 경우 3개의 스트레인게이지를 용접 토우로부터 0.4t, 0.9t 및 1.4t 떨어진 위치에 부착하여 계측하는 2차 외삽법을 사용하는 것이 바람직하다. 이 경우, 핫스팟 변형률은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon_{hs} = 2.52\epsilon_A - 2.24\epsilon_B + 0.72\epsilon_C \tag{2}$$

다수의 스트레인게이지를 이용하는 경우에는, 일정 간격 하에 일렬로 1 세트로 구성된 스트레인게이지를 사용하여 계측할 때, 위에서 제안한 B 및 C 위치에 스트레인게이지가 부착되지 않기 때문에 4개의 스트레인게이지를 이용하여 결과를 내(외)삽 하는 방법이 사용된다.

응력상태가 1 축인 경우 구조적 HSS는 핫스팟 변형률을 이용하여 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\sigma_{hs} = E \epsilon_{hs} \tag{3}$$

그러나 2축 응력 상태인 경우 실제 응력은 식 (3)으로부터 구한 값보다 10%까지 높아지며, 정확도를 높이기 위해서는 로제트 스트레인 게이지를 사용하는 것이 바람직하다. 또는 FE 응력해석 결과로부터 길이 방향 및 수직 방향의 변형률 값을 이용하여 식 (4)를 이용하여 구조적 응력, σ_s 를 구할 수 있다.

$$\sigma_s = E\epsilon_x \frac{1 + \nu \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}}{1 - \nu^2} \tag{4}$$

이 경우, 절대 변형률 값보다는 변형률 진폭 $\Delta\epsilon = \epsilon_{max} - \epsilon_{min}$ 을 계측하고 위 식(4)를 이용 구조적 응력 진폭, $\Delta\sigma_s$ 를 구한다.

2.4 FE 해석결과의 평가

설계단계에서 구조적 HSS를 결정하기 위한 유한요소 응력해석은 아주 유용한 도구로 사용되며, 용접 토우에 수직 또는 +/- 45°내의 판재 표면의 주응력을 이용하여 구조적 HSS를 계산할 수 있다. 이 경우, HSS 진폭이 재료 항복강도의 2배를 초과하지 않아야 하기 때문에 재료가 탄성거동 한다고 가정하여 해석을 수행한다.

유한요소 응력해석은 구조적 HSS 진폭을 구하는 것

을 목적으로 하기 때문에 적어도 두개 이상의 최대, 최소 하중조건에 대하여 해석하여야 하며, shell 과 solid 두 가지 요소가 사용된다.

유한요소 응력해석의 결과를 평가할 경우 오류를 피하는 방법으로서 다음과 같은 사항을 주의하여야 한다.

- 일반적인 유한요소해석 후처리 프로그램은 용접도우에 인접한 두 요소의 평균값을 절점기준으로 출력하여 보여주기 때문에 보고자하는 요소의 결과 값을 읽어야 한다.
- 비선형 peak 응력을 제외한 값을 사용해야 하며, 두께를 8절점 입체요소 혹은 감차적분(reduced integration) 20절점 요소를 사용하여 한 층으로 모델링 한 경우 두께 방향으로 선형의 응력 분포가 얻어진다. 두께를 다층으로 요소 분할한 경우 해석 결과는 다소 정확한 비선형 응력 분포 결과를 얻을 수 있으며, 이것으로부터 응력이 선형 분포하는 부분 혹은 구조적 HSS를 Fig. 5와 같이 3 부분으로 나누어 구할 수 있다.

대형 구조물(예를 들어 선각 등)의 경우, 용접 도우부에 대한 정확한 해석결과를 얻기 위해 세밀한 요소 분할을 이용하여 전체구조를 유한요소 응력해석을 하는 것은 비실용적이다. 따라서 현실적인 적용 가능 방법으로는 Type "a" 핫스팟을 $t \times t$ (t : 판두께)의 크기로 요소 분할하는 것이 적당하다. 용접 도우를 날카로운 노치로 모델링하면 해의 특이성(Singularity) 영향에 의하여 노치 선단 첫 번째 요소의 응력이 다소 과장되는데, 이는 상대적으로 떨어진 외삽 위치의 값을 이용하는 외삽법의 오차에 의해 상쇄된다.

2.5 FE 응력해석을 통한 HSS의 평가방법

다수의 응력 집중부위를 갖는 대형 구조물의 응력해석은 두 단계로 나누어 해석을 수행할 수 있다.

- 1) Coarse 모델을 해석하여 응력 집중처를 파악하고,
- 2) 파악된 응력 집중부위를 sub-modeling하고 sub-model의 경계에 절점의 변위(boundary displacement)나 절점의 하중(nodal force)을 하중조건으로 하여 상세해석을 수행하거나, 초기 coarse model의 응력 집중처의 요소를 작게 요소 분할하여 해석을 수행한다.

일반적으로 응력 해석결과로서 후처리 프로그램을 통해 얻는 응력 집중부위의 응력은 엄밀해가 아니기 때문에, 응력 집중부위 주변 요소의 수치적분점의 응력 혹은 응력 집중부위로부터 일정거리 떨어진 절점의 응력

을 이용해야 하며, 응력집중부위의 응력 및 응력구배가 높은 정확성을 가질 수 있도록 요소의 크기를 세분화해야 한다.

2.6 요소선택 및 HSS 계산법

본 절에서는 유한요소 해석을 통해 HSS를 계산할 경우 요소선택에 있어 일반적으로 고려해야 할 사항을 정리한다.

판의 굽힘 영향을 고려할 수 있는 요소를 사용해야 하며, 이것이 가능한 요소로는 쉘과 입체요소를 들 수 있다. 쉘요소를 사용하는 경우 판재 두께의 중심선(middle plane)을 따라 모델링하고 판재의 두께는 요소의 물성으로 고려한다. 쉘요소를 사용하는 경우, 용접선을 고려하지 않으면 인접하는 불연속부 간의 판재 강성이 너무 낮게 고려된다. 예를 들면 Fig. 8과 같이 사각 중공 용접 조인트의 경우, 정확한 강성을 고려하기 위해서는 용접선간의 간격 g' 를 고려하여야 하며, 이와 같은 경우 입체요소가 바람직하다.

2.6.1 상대적으로 coarse한 요소를 사용할 수 있는 경우 (Type "a" joints)

전술한 바와 같은 일반적인 주의가 지켜진다면, 다음의 경우에 대해서는 상대적으로 coarse한 요소가 사용 가능하다.

- 주변에 심한 불연속부가 없는 경우
- 응력 집중치의 응력 구배가 심하지 않은 경우
- 8-node shell 혹은 20-node solid 요소가 사용되는 경우
- 요소의 mid-point 혹은 mid-side node의 응력 값이 사용된 경우
- 부재의 두께가 30mm 이하인 경우

a) Thin shell(plate) 요소를 사용하는 경우

구조물의 중심선을 따라 Fig. 9(c)와 같이 thin

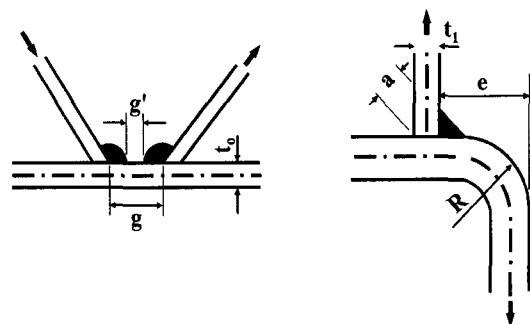


Fig. 8 Details in which thin shell elements are not appropriate

plate나 shell 요소를 사용하여 모델링하는 것이 가장 손쉬운 방법이다. 급격한 응력구배가 발생하는 type "b" joint의 경우 8-node 요소를 사용하는 것이 바람직하며 통상 용접부는 모델링하지 않는다. 그러나 Fig. 8과 같이 국부적인 불연속부 간에 큰 국부 굽힘 하중이 작용하는 경우는 Fig. 11과 같이 용접부를 고려하여야 한다.

용접부 고려를 위한 간단한 대안으로, Fig. 9(d)와 같이 용접부를 경사지게 고려하고 용접선에 해당하는 요소에 reinforced plate strip을 사용하면 된다. 이 경우 strip의 두께는 용접 각장, L 만큼 증가시켜야 한다. 그러나 이 방법은 Fig. 9(d)의 3가지 HSS의 경우에만 적합하며, 용접선에 수직한 주판의 응력 평가의 경우에는 바람직하지 않다.

응력 방향과 평행한 shell 요소의 길이는 1.0t면 적절하나, 브래킷 옆의 응력 방향과 수직한 요소의 경우는 폭의 길이에 다소 민감하다. 따라서 shell 요소를 사용하여 큰 구조물을 모델링하는 경우, 유사형상에 대한 solid 요소의 결과를 참고하여 shell 요소의 폭을 결정하여야 한다.

b) Solid 요소를 사용하는 경우

20절점 입체 등매개변수(Isoparametric) 요소를 사용하면, 두께를 1층으로 요소분할해도 복잡한 형상의 경우에도 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 두께 방향으로 두개의 적분점 (2 integration points)을 갖는 감차적분요소를 사용하면 막응력 및 굽힘응력을 쉽게 평가할 수 있으며, 용접부 모델링은 Fig. 9(b)와 같이

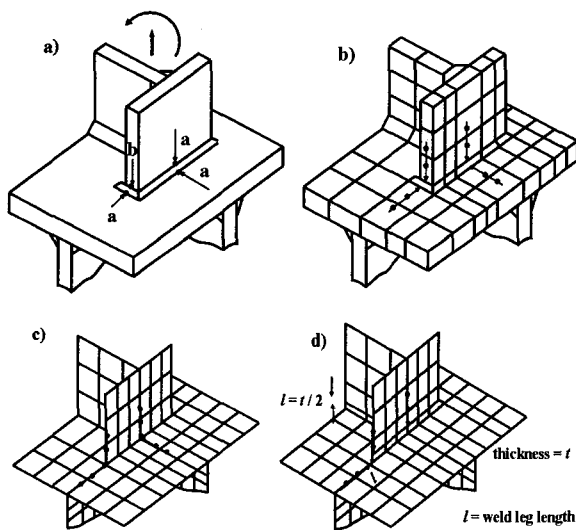


Fig. 9 Examples of relative coarse meshing

할 수 있다.

c) 핫스팟 응력 계산용 외삽법

앞서 언급된 모델링 기법들을 이용한 응력해석 결과를 외삽하는 방법은 다음과 같다.

- 0.5t와 1.5t 절점 위치를 이용한 선형 외삽법 (Linear extrapolation)

$$\sigma_{hs} = 1.5\sigma(0.5t) - 0.5\sigma(1.5t) \tag{5}$$

- 0.5t, 1.5t 및 2.5t 절점 위치를 이용한 2차 외삽법 (Quadratic extrapolation)

$$\sigma_{hs} = 1.875\sigma(0.5t) - 1.25\sigma(1.5t) + 0.375\sigma(2.5t) \tag{6}$$

외삽시 절점의 위치는 solid 모델의 경우 용접 토우로부터의 거리이며, shell 모델의 경우 교차점으로부터의 거리이다. 외삽 식(5), (6)을 사용하는 경우, solid 요소를 사용한 경우에는 하중방향으로 길이 1.0t인 solid 요소의 중간 절점(mid-point)의 응력 값을 사용하며, shell 요소인 경우 역시 요소의 중간절점의 응력 값을 사용하여야 한다.

외삽 식 (5)와 (6)은 미세 요소 분할한 경우에는 HSS 값을 작게 평가하기 때문에 사용하지 말아야하며, 요소 크기에 민감하기 때문에 규정된 크기의 요소를 사용하는 것이 중요하다.

2.6.2 상대적으로 fine한 요소를 사용하는 경우 (Type "a" joints)

다음의 경우 fine한 요소를 사용한다.

- Fig. 8의 인접 불연속부 사이
- 응력 집중처에 근접하여 높은 응력 구배를 갖는 joint의 경우
- 4-node shell 요소나 8-node solid 요소를 사용하는 경우
- 두꺼운 판재로된 구조물을 해석하는 경우
- 시편의 응력 집중처를 해석하는 경우

필요한 요소의 크기는 사용하는 외삽 방법에 따라 다르다.

상기의 모델링 기법을 채용한 경우 외삽규칙은 다음과 같다.

- 0.4t와 1.0t 절점 위치를 이용한 선형 외삽법

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma(0.4t) - 0.67\sigma(1.0t) \quad (7)$$

• 0.4t, 0.9t 및 1.4t 절점 위치를 이용한 2차 외삽법

$$\sigma_{hs} = 2.52\sigma(0.4t) - 2.24\sigma(0.9t) + 0.72\sigma(1.4t) \quad (8)$$

식(7)과 (8)의 외삽법은 절점의 응력을 직접 읽는 것이 바람직하며, Fig. 10과 같이 하중방향으로 첫 번째 요소의 경우 길이 0.4t, 두 번째 요소의 경우 길이 0.6t 이어야하며, 식(9)의 경우 1, 2, 3번째 요소의 길이가 0.4t, 0.5t, 0.5t를 넘지 않아야한다. Fig. 10과 같이 불연속부에 근접한 경우, 4-node shell 및 8-node solid 요소를 사용하는 경우에는 세밀한 요소 분할이 필요하다.

식(7)은 쉘의 굽힘응력에 의한 급격한 응력 구배가 없는 경우 사용할 수 있고, 반대의 경우에는 식(8)이 바람직하다.

Fig. 1(e)와 (j)는 판재나 플랜지에 브래킷이 용접된 예로, 필릿 용접을 모델링하지 않고 세밀한 shell 요소를 사용하여 모델링하는 경우 브래킷 전체가 하나의 nodal line으로 연결되고, 이 경우 브래킷 주위의 막응력에 대한 응력집중이 심하게 과장된다. 실제로 브래킷과 같은 부착물의 폭은 브래킷의 두께와 양면 필릿용접에 따른 두개의 용접각장의 두께와 같다. 따라서 solid 요소를 이용한 해석의 경우 훨씬 낮은 응력집중을 보이며, shell 요소를 사용한 모델의 경우 용접부를 고려하여야 하며, 그렇지 않은 경우 다음의 과정을 거쳐야 한다.

부착물 길이에 수직한 방향인 부착물 두께 폭의 평균 응력 값을 사용하여 부착물 선단의 실제 응력을 평가할 수 있으며, 선형 외삽의 경우 브래킷 선단의 0.4t 및 1.0t 위치의 평균 응력 값을 이용하면 정확한 평가가

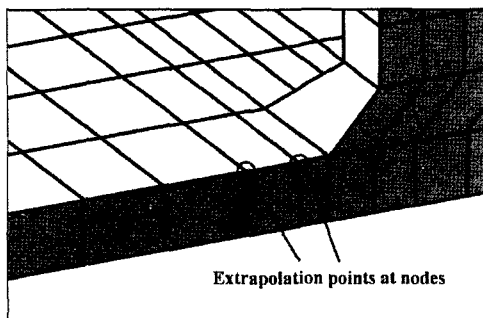


Fig. 10 An example of simple solid element modelling of a bracket welded on a plate

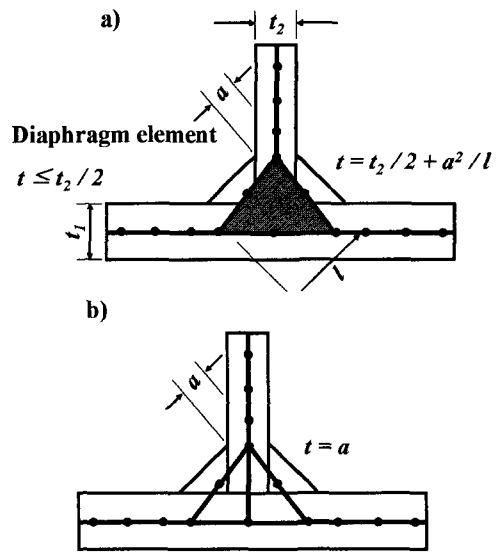


Fig. 11 Fillet welds in T-joints modelled with inclined elements

가능하다.

2.6.3 Shell 요소를 사용하여 Type “a” joints를 모델링하는 방법

Shell 요소를 사용하는 경우, 용접부를 고려하여야 하며, Fig. 11과 같이 경사 요소를 사용하여 고려할 수 있다. Fig. 11(a)의 경우, 주판의 membrane strain에 의한 용접부 요소의 변형을 방지하기 위하여 면에 수직한 diaphragm 요소를 삽입한 경우이며, Fig. 11(b)의 경우는 주판의 중심선 까지 attached plate의 요소를 연장한 것으로 Fig. 11(a)보다 cross section 단면을 과장하는 단점이 있다.

2.6.4 Quadratic extrapolation을 사용하는 경우

Type“a” joint의 응력 구배가 심한 경우 식(6)과 (8)의 2차 외삽 식을 사용한다. Fig. 12에 예를 나타낸다.

2.6.5 Type “b” joints 상세

용접각장 및 거셋 형상에 따른 구조적 응력의 경우, 응력이 비선형적으로 동일 평면상에 분포하기 때문에 용접 토우의 국부 영향과 구조적 형상의 불연속에 따른 영향을 분리하기는 쉽지 않다.

8-node plate, shell 요소 혹은 20-node solid 요소를 사용하여 용접 토우부를 $w \times w$ 의 크기로 요소 분할하는 경우, 요소의 길이 w 는 plate 두께 t 혹은 용접 각장의 2배 중 작은 것으로 하며, 이 경우 w 는 8

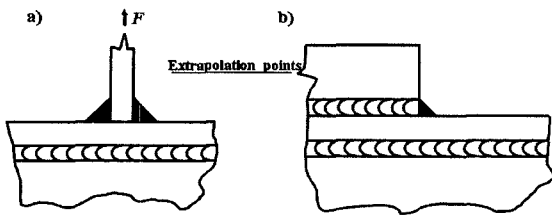


Fig. 12 Examples of details for which quadratic extrapolation is recommended

mm 보다 커야한다.

용접 토우의 첫 번째 요소의 응력은 용접 토우에서의 해의 특이성으로 인하여 증가하기 때문에 다소 coarse 한 요소를 사용하여 보상한다.

용접 토우부에 대한 2차 외삽 식은 다음과 같다.

$$\sigma_{hs} = 1.875\sigma(0.5t) - 1.25\sigma(1.5t) + 0.375\sigma(2.5t) \quad (9)$$

위에 설명된 2차 외삽 방법은 요소의 크기에 민감하기 때문에 규정된 요소 크기를 준수하여야한다.

3. HSS Round-Robin Test

본 장에서는 대한용접학회 강도분과 연구위원회에서 수행한 용접부 HSS 계산 결과를 소개한다. 자체적으로 제작한 표준 시험편을 대상으로 세 군데의 기관이 참여하여 Round-Robin 시험을 수행하였고 도출 결과의 편차분석을 통하여 HSS 계산에 있어서 활용할 수 있는 기본 참고사항을 정리하였다.

3.1 표준 시험편 제작

Fig. 13은 RR테스트용으로 제작되어진 시험편을 나타낸다. 2장에서 정의한 핫스팟 형태 중에서 Type "a"에 해당되는 것이며, 각각 횡 및 종 거셋을 부착하여



Fig. 13 Standard specimens for Hot Spot Stress evaluation

용접부 형상 차이를 고려하고 있다. 각 시험편을 대상으로 인장 및 굽힘실험을 수행하고 응력계측을 수행하였다. 얻어진 응력계측 결과는 유한요소해석을 통해서 얻어지는 HSS결과와의 비교에 이용되었다.

Fig. 14 및 15에는 Fig. 13에서 보이는 표준 시험편의 인장 및 굽힘시험 사진을 보인다.

3.2 HSS 산정용 유한요소해석

Fig. 16은 Fig. 15에서 보이는 실험을 대상으로 하는 HSS 계산용 유한요소해석 모델을 보이고 있다. 하중 조건으로는 실험에서 사용한 조건, 즉 인장하중 3000kgf 및 3점 굽힘 시험용 집중하중 700kgf이며 각 기관에서 사용하는 요소 및 경계조건 등은 자율적으



Fig. 14 Tensile test of standard specimen (left: transverse gusset, right: longitudinal gusset)

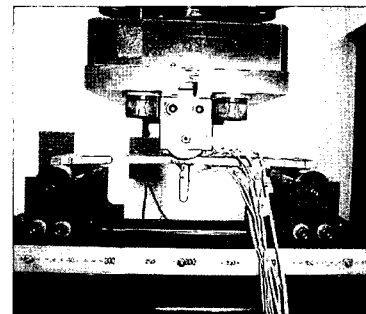


Fig. 15 Bending test of standard specimen (upper: transverse gusset, lower: longitudinal gusset)

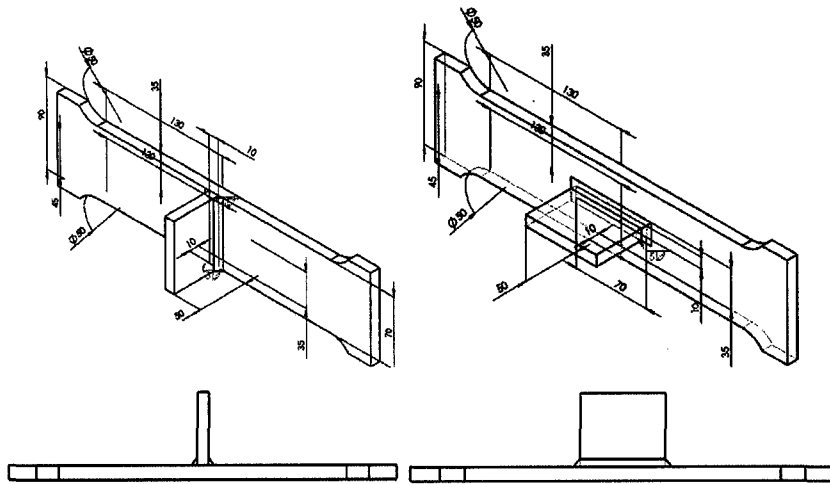


Fig. 16 Geometries of the specimens (left: Type 1, right: Type 2)

로 선정하였다.

각 기관별 편차분석을 위하여 상기의 모델들은 횡거셋 부착은 Type 1, 종거셋 부착은 Type 2로 정의하였다.

3.2.1 유한요소해석

각 기관으로부터 얻어진 결과분석에 앞서 각기 사용한 해석용 코드, 요소종류, 대표적 모델링 결과 및 HSS 계산용 외삽규칙을 Table 1에 나타낸다. Table 2~3에는 각 기관별로 얻어진 HSS 계산결과를 정리한다. 각 계산시에 용접비드 고려여부의 영향도 분석하였으며 요소크기를 변화시켜가며 1차외삽과 2차외삽의 영향도 분석하였다. 실험으로부터 얻어진 응력계측결과와 비교를 수행하여 오차분석을 수행하였다. 각 표에서 나타내는 오차율의 계산에서, 특정 경우에 대해 한 종류의 외삽규칙을 적용한 경우는 계산결과 그대로를 사용하였고, 두 종류의 외삽규칙을 사용한 경우는 둘 중에서 실험결과와 더 큰 오차를 나타내는 쪽을 비교대상으로 삼았다.

3.2.2 해석 결과 및 고찰

각 기관별로 수행한 HSS 계산 결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 인장하중이 지배적인 문제의 HSS 평가를 위한 유한요소해석에는 shell 요소 및 연속체 요소를 모두 사용할 수 있다.

- Shell 요소를 사용하는 경우 요소의 절점 수 및 차수에 따른 평가 결과의 차이는 크지 않다.
- 연속체 요소의 경우에도 절점 수 및 차수에 따른 차이는 작았다.
- 외삽 방법으로서 1차 선형(linear) 외삽과 2차(quadratic)

외삽으로 평가된 HSS 값의 차이도 크지 않았다.

2) 큰 굽힘 하중이 작용하는 문제의 HSS 평가를 위한 유한요소해석에 shell 요소를 사용하면 평가 결과를 신뢰할 수 없다.

- 굽힘 하중이 지배적인 문제에는 연속체 요소의 사용을 권장하며 이 경우 요소의 절점 수 및 차수에 따른 결과 차이는 크지 않다.
- 외삽 방법으로는 2차 외삽을 권장할 수 있다.

3) 평가 영역의 요소 크기가 IIW의 권고안을 만족하는 상태이면 요소 크기에 따른 결과의 편차는 그다지 크지 않다.

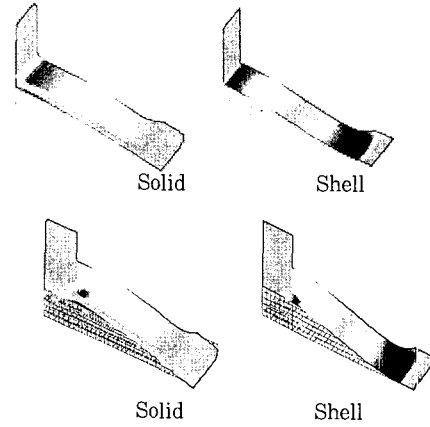
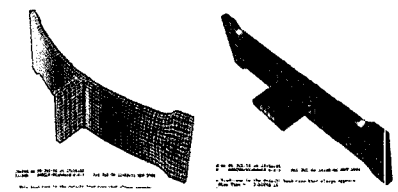
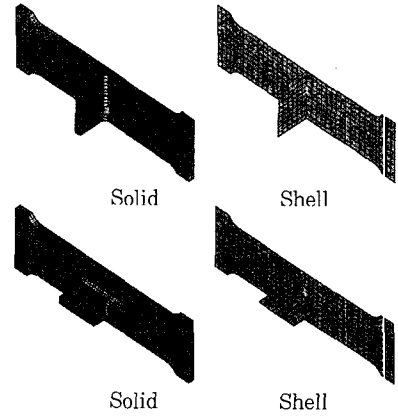
4) 평가 영역에 대한 용접비드의 모델링 여부가 평가 결과에 큰 영향을 미치지 않으며 shell 요소의 경우 무시 가능한 수준이다.

4. 결 론

본 일반 지침에서는 용접부 피로성능 평가를 위한 기준응력으로서 과거 몇 년간의 정립 과정을 거쳐 최근 가장 보편적으로 이용되는 HSS의 구조 해석적 계산 방법을 제시하였다.

용접부의 성능 평가 및 성능 향상을 위한 설계를 위해 필수적으로 채용되는 유한요소해석을 기반으로 하는 응력 도출기법 및 HSS 계산을 위한 몇 가지 외삽 규칙에 관하여 참여기관 별로 정보공유를 차단한 상태에서 수행한 계산 및 실험 결과를 바탕으로 분석한 결과 일반적으로 참고할 수 있는 지침을 얻을 수 있었다. 본 일반 지침에 따르면 실제 용접 구조물 제작 업체에서 안고 있는 난점들 중의 하나로서 적용 기준별로 상이한

Table 1 FEA details for Hot Spot Stress evaluation

	FEA Code	FE Mesh		Extrapolation rule	FE modeling sample
		Type 1	Type 2		
A	I-DEAS	Solid/Shell	Solid/Shell	Linear/Quadratic	
B	ABAQUS	Solid	Solid	Linear/Quadratic	
C	ANSYS	Solid/Shell	Solid/Shell	Linear/Quadratic	

결과도출 현황 및 동일조건임에도 불구하고 나타날 수 밖에 없는 편차가 야기하는 정보의 혼선을 많은 부분 방지할 수 있는 것으로 판단된다.

본 건에서 정리된 내용은 핫스팟 응력을 구조 해석적 방법을 통해 합리적으로 계산하기 위해 우선 고려해야 할 사항들로서 용접부 피로 설계에 관한 기초 자료로서 유용하게 활용될 수 있으며 향후 이루어질 추가적인 평가 과정에 참고자료로 제공되어 보다 보충 보완될 수 있기를 기대 한다.

후 기

본 건은 대한용접학회 산하 용접강도연구위원회에서 주관하고 부산대학교, 한국전력기술(주), 현대중공업(주) 현대삼호조선(주) (이상 가나다 순)의 연구 지원 및 3차의 round robin을 통한 공동 연구 활동의 결과를 바탕으로 정리되었으며, 부산대학교 이계명 회원과 현대중공업(주)의 김현수 회원이 공동 집필하였다. 본 건을 위해 참여해 주신 기관과 지원에 감사드립니다.

Table 2 Hot Spot Stress evaluation results 1/3

FEA model	Tension	Bending	Coarse/ Fine	Element		Size	Weld effect		HSS(MPa) by Extrapolation method		Exp. (Error,%)
				Shell	Solid		Bead shape	THK.	Linear	Quad.	
Type1	O		F	4node		0.5(t×t)	No	No	41.96	41.93	52.34 (-19.9)
	O		F	8node		0.5(t×t)	No	No	41.95	41.92	52.34 (-19.9)
		O	F	4node		0.5(t×t)	No	No	218.66	214.25	414.08 (-48.3)
		O	F	8node		0.5(t×t)	No	No	228.77	226.12	414.08 (-45.4)
	O		F	4node		0.5(t×t)	Yes	No	41.79	41.69	52.34 (-20.3)
	O		F	8node		0.5(t×t)	Yes	No	41.79	41.99	52.34 (-20.1)
		O	F	4node		0.5(t×t)	Yes	No	212.88	211.11	414.08 (-49.0)
		O	F	8node		0.5(t×t)	Yes	No	220.43	218.57	414.08 (-47.2)
	O		F		8node	0.5(t×t)	Yes	Yes	45.13	45.62	52.34 (-13.8)
	O		F		20node	0.5(t×t)	Yes	Yes	43.56	43.56	52.34 (-16.8)
		O	F		8node	0.5(t×t)	Yes	Yes	510.81	522.28	414.08 (+26.1)
		O	F		20node	0.5(t×t)	Yes	Yes	476.37	479.91	414.08 (+15.9)
Type2	O		F	4node		0.5(t×t)	No	No	76.71	79.07	60.38 (+30.9)
	O		F	8node		0.5(t×t)	No	No	70.63	71.71	60.38 (+18.8)
		O	F	4node		0.5(t×t)	No	No	230.14	245.54	448.12 (-48.6)
		O	F	8node		0.5(t×t)	No	No	194.73	201.50	448.12 (-56.5)
	O		F	4node		0.5(t×t)	Yes	No	73.97	76.03	60.38 (+25.9)
	O		F	8node		0.5(t×t)	Yes	No	77.99	81.23	60.38 (+34.5)
		O	F	4node		0.5(t×t)	Yes	No	192.77	203.07	448.12 (-56.9)
		O	F	8node		0.5(t×t)	Yes	No	176.97	186.68	448.12 (-60.5)
	O		F		8node	0.5(t×t)	Yes	Yes	60.04	62.49	60.38 (+3.5)
	O		F		20node	0.5(t×t)	Yes	Yes	55.92	57.49	60.38 (-7.4)
		O	F		8node	0.5(t×t)	Yes	Yes	564.37	601.16	448.12 (+34.2)
		O	F		20node	0.5(t×t)	Yes	Yes	493.84	514.63	448.12 (+14.8)

Table 3 Hot Spot Stress evaluation results 2/3

FEA model	Tension	Bending	Coarse/ Fine	Element		Size	Weld effect		HSS(MPa) by Extrapolation method		Exp. (Error,%)
				Shell	Solid		Bead shape	THK.	Linear	Quad.	
Type 1	O		C		20 node	t×t	Yes	Yes	49.64		52.34 (-5.2)
Type 1	O		F		20 node	0.5(t×t)	Yes	Yes	56.38		52.34 (+7.7)
Type 2	O		C		20 node	t×t	Yes	Yes	44.59		60.38 (-26.2)
Type 2	O		F		20 node	0.5(t×t)	Yes	Yes	46.19		60.38 (-23.5)
Type 1		O	C		20 node	t×t	Yes	Yes	534.16		414.08 (+29.9)
Type 1		O	F		20 node	0.5(t×t)	Yes	Yes	582.25		414.08 (+40.6)
Type 2		O	C		20 node	t×t	Yes	Yes	511.47		448.12 (+14.1)
Type 2		O	F		20 node	0.5(t×t)	Yes	Yes	523.73		448.12 (+16.9)
Type 1	O		C		20 node	t×t	Yes	Yes		50.90	52.34 (-2.8)
Type 1	O		F		20 node	0.5(t×t)	Yes	Yes		58.87	52.34 (+12.5)
Type 2	O		C		20 node	t×t	Yes	Yes		45.45	60.38 (-24.7)
Type 2	O		F		20 node	0.5(t×t)	Yes	Yes		47.17	60.38 (-21.9)
Type 1		O	C		20 node	t×t	Yes	Yes		506.93	414.08 (+22.4)
Type 1		O	F		20 node	0.5(t×t)	Yes	Yes		549.16	414.08 (+32.6)
Type 2		O	C		20 node	t×t	Yes	Yes		529.24	448.12 (+18.1)
Type 2		O	F		20 node	0.5(t×t)	Yes	Yes		541.21	448.12 (+20.8)

Table 4 Hot Spot Stress evaluation results 3/3

FE model	Tension	Bending	Coarse/ Fine	Element		Size	Weld effect		HSS(MPa) by Extrapolation method		Exp. (Error,%)
				Shell	Solid		Bead shape	THK.	Linear	Quad.	
Type1	O		C		20node	t×t	Yes	Yes	44.34	44.64	52.34 (-15.3)
	O		F		8node	0.5(t×t)	Yes	Yes	45.91	46.50	52.34 (-12.3)
	O		F		20node	0.5(t×t)	Yes	Yes	43.16	43.07	52.34 (-17.7)
	O		C	4node		t×t	No	No	41.99	41.99	52.34 (-19.8)
	O		F	4node		0.5(t×t)	No	No	41.89	41.79	52.34 (-19.8)
	O		C	8node		t×t	No	No	41.89	41.89	52.34 (-19.9)
	O		F	8node		0.5(t×t)	No	No	41.89	41.89	52.34 (-19.9)
Type2	O		C		20node	t×t	Yes	Yes	56.41	58.66	60.38 (-6.6)
	O		F		8node	0.5(t×t)	Yes	Yes	56.41	58.76	60.38 (-6.6)
	O		F		20node	0.5(t×t)	Yes	Yes	54.74	56.80	60.38 (-9.3)
	O		C	4node		t×t	No	No	52.39	52.78	60.38 (-13.2)
	O		F	4node		0.5(t×t)	No	No	52.97	54.74	60.38 (-12.3)
	O		C	8node		t×t	No	No	57.58	60.14	60.38 (-4.6)
	O		F	8node		0.5(t×t)	No	No	50.72	51.80	60.38 (-16.0)