

< 기술논문 >

피로 해석을 고려한 점용접부 모델링 기법의 성능 평가

주병현[†] · 변형배* · 이병채**

(2005년 3월 4일 접수, 2005년 7월 8일 심사완료)

Performance Evaluation for the Methods of Spot Weld Modeling Considering Durability

Byung-Hyun Joo, Hyung-Bae Byun and Byung-Chai Lee

Key Words : Spot weld(점용접), Modeling(모델링), Durability(내구도)

Abstract

Many methods of spot weld modeling have been developed to increase efficiency and guarantee the robustness for the CAE analysis. In this research they are introduced and the performance is compared in a viewpoint of stiffness and durability. For evaluating the performance a multi-spot welded specimen as well as two single welded specimen is used. The results show that the CWELD element considering 'patch to patch' is stiffer than other modeling methods in stiffness and more conservative in durability. It also offers simple modeling and since it is much easier to maintain the orthogonality of the BAR element expressing a nugget, we can obtain more exact reaction forces and moments in a nugget. Therefore the CWELD element is the most excellent in the assessment of durability.

1. 서 론

1.1 연구 동기

자동차 산업에서 CAE 기반 설계는 품질향상과 개발기간의 단축에 크게 기여하고 있으며 점점 그 사용 범위가 넓어지고 있는 추세이다. 이런 추세를 반영하듯 내구도를 평가 하기 위해 CAE 를 많이 이용하고 있으며 점용접부를 포함한 구조물에도 적용을 확대하고 있다.

그러나 내구에 민감한 용접부에 대해서는 피로 해석 결과와 실험 결과에 큰 차이를 보이고 있는 것이 현실이며 유한 요소 해석 단계에서 점 용접부를 모델링 하는 방법에 따라 그 결과도 상당히 달라지게 된다. 그러므로 모델링 기법이 용접구조물의 강성과 내구도에 미치는 영향을 평가하는 것

은 매우 중요하다. 또한 점용접부에 대한 피로 해석을 위해서는 점용접부 내부와 둘레에서의 응력, 변형률을 얻어내야 하지만 실험적으로 얻어내기가 쉽지 않다.

그러므로 본 논문에서는 다양한 점용접부 모델링 기법에 대해 고찰한 뒤 용접 너깃에서의 반력과 모멘트를 이용하여 내구도를 평가할 수 있는 기법을 소개한다. 그리고 이를 바탕으로 점용접부의 강도와 내구도 관점에서 점용접 파라미터에 따라 비교, 분석한 후 점용접부의 모델링에 가장 적합한 모델을 찾는 것이 목적이다.

1.2 문헌 조사

Rupp 에 의해 처음으로 용접부에서의 힘과 모멘트를 이용하여 구조응력을 구한 뒤 이를 피로 해석에 적용하는 방법이 제안되었으며 이때 용접부의 너깃을 모델링 하기 위해 1 차원 요소를 사용했다.⁽¹⁾ 그 이후 많은 모델링 기법들이 이를 개선하는 방향으로 제안되었다.⁽²⁻⁴⁾ 이와는 달리 점용접부의 너깃을 3 차원 유한요소 모델로 모델링 하고 국부변형률 근사법을 이용하여 피로수명을 구하는 방법도 제안되었다.⁽⁵⁾ 그러나 자동차의 프레임과 같이 수 천개의 용접점으로 구성된 구조물을 모델링 하기에는 부적절하다.⁽⁶⁾

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : joobi@casad.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-5034 FAX : (042)869-3210

* GM 대우 차체 설계팀

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

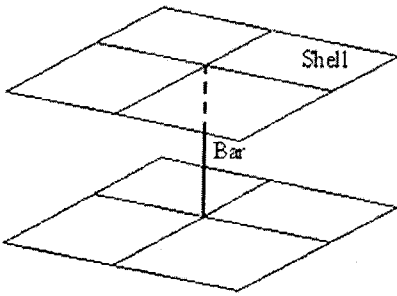


Fig. 1 A simple bar shell model

2. 점용접 모델링 기법

2.1 단순 바 셸 모델

단면이 원형이고 해당 용접 너질의 단면과 같은 바 요소(bar element)를 이용하여 Fig. 1 과 같이 두 셸 요소(shell element)의 절점을 연결하는 방법으로 자동차 구조물에서 점용접을 표현하는 가장 보편적인 방법이다. 이 때 두 박판 사이의 거리를 나타내는 연결 요소의 길이는 두 박판 두께의 절반이 되도록 설정한다. 피로 해석을 위한 너깃 둘레에서의 응력은 바 요소로 연결된 모델로부터 직접 구할 수 없다. 따라서 너깃 둘레에서 응력을 구할 때는 연결 요소에 작용되는 합력과 너깃의 지름, 박판의 두께 정보를 이용하여 너깃 둘레에서의 응력에 상응하는 구조 응력을 구한다.

2.2 CWELD 모델⁽⁹⁾

상용 유한 요소 해석 프로그램인 FEAsolt Stra-D 나 MSC.Nastran 에는 CWELD 라는 용접 요소를 탑재하고 있다. 이 용접 요소는 단순 바-셸 요소 형태의 점용접 표현과 같은 방법으로 점용접부를 모델링 하고 있다. 특징적인 것은 모델링의 편의를 제공하기 위해 절점과 절점 사이의 연결(node to node connection)을 나타낼 수 있으며, 요소와 요소 사이의 연결(patch to patch connection), 요소와 절점 사이의 연결(node to patch connection)등 다양한 방식으로 점용접을 표현하는 것이 가능하다. 이 중 요소와 요소 사이의 연결에 대해 Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 2 에서 SHIDA 와 SHIDB 는 각각 셸 요소를 나타내며 GA 와 GB 는 이에 대응하는 절점 그리고 GS 는 바 요소가 투영되는 기준 절점이다. 하지만, 역시 이 연결 요소만으로는 너깃 둘레에서의 응력을 구할 수 없으며, 단순 바-셸 요소로 표현된 점용접부 해석과 마찬가지로 방법으로 점용접 요소에 작용하는 합력과 너깃의 지름, 연결요소 연결된 박판의 두께 정보를 이용하여 너깃 둘레에서의 응력에 상응하는 국부 구조 응력을 구한다.

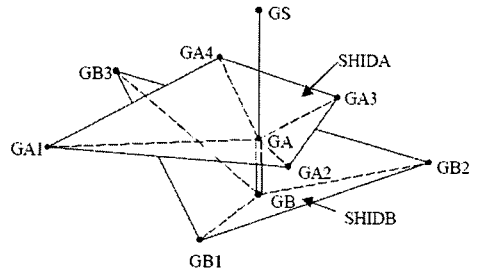


Fig. 2 Patch to patch connection in a CWELD element

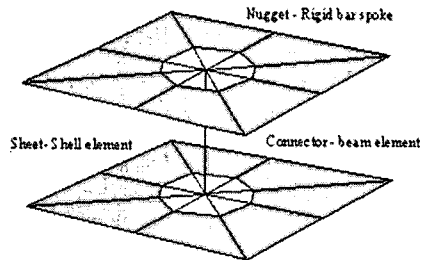


Fig. 3 A rigid bar spoke model

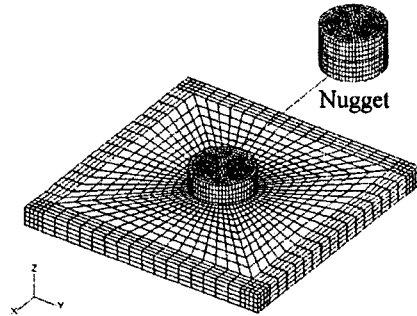


Fig. 4 A three dimensional model

2.3 강체 바 스포크(Rigid bar spoke) 모델

앞서 언급한 것처럼 점용접 너깃을 짧은 바 요소를 사용하여 용접 너깃을 표현하는 경우에 용접부의 너깃 강성이 과소평가되는 경향을 보인다. 방사형 강체 요소를 너깃 둘레에 배치한 이 기법은 이러한 문제를 해결하기 위해 용접점에서의 선별적 두께 증가 기법과 더불어 제시된 방법으로, 용접점을 중심으로 너깃의 반지름에 해당하는 길이의 강체 요소를 방사형으로 배치한 기법이다.

방사형으로 배치되는 강체 요소의 개수는 Fig. 3 과 같이 각 박판당 8 개이며, 너깃을 표현하는 방사형 강체 요소와 박판 사이의 연결을 위해 후처리에서 너깃부에서의 요소망에 대한 편집이 요구된다. 너깃부의 표현은 각 박판에서는 방사형 범위로 표현되지만, 두 박판 사이의 연결은 단순 바-셸 요소 형태의 경우와 마찬가지로 단순 바 요소를 이용하여 연결된다. 너깃 둘레에서의 응력은 연결 요소에 작용하는 합력을 이용하여 국부 구조 응력을 구하거나, 너깃 둘레에서의 절점 응력 혹

은 둘레 인접 요소에서의 응력을 직접적으로 이용한다.

2.4 3차원 유한 요소 모델

개개의 점용접 너깃에 대해 상세 모델링을 하는 기법으로 Fig. 4 와 같은 형태이다. 하지만, 하나의 용접점을 표현하기 위해서 많은 유한 요소가 요구되며, 자동차 구조물과 같이 점용접의 개수가 많은 경우에 이를 상세하게 모델링하는 것은 실제적인 면에서 적용성이 떨어진다.

3. 점용접부의 내구도 평가

3.1 피로 해석을 위한 물성치의 결정

현재 대부분의 피로 상용프로그램에서 사용되는 점용접 모델은 Rupp/LBF 모델로 단순 바 쉘 모델과 같다고 말할 수 있다. (1) 이와 같이 단순 바 쉘 모델이 주로 사용되는 이유는 모델링의 간편함이라는 장점이 있지만 피로해석을 위한 물성치가 바로 단순 바 쉘 모델을 기반으로 만들어졌기 때문이다.

이런 물성치를 얻기 위해 단순 바 쉘 모델은 용접부에서의 힘과 모멘트를 이용한다는 것을 고려해야 한다. 점용접의 피로 물성치는 보통 용접이 되어 있는 단순 시편으로부터 만들어지는데 수명에 대한 피로하중(fatigue load range versus life)의 그래프를 얻을 수 있다. 이런 단순시편들의 피로 물성치는 시편의 치수와 박판의 두께 그리고 용접 너깃의 크기에 영향을 받기 때문에 이런 파라미터에 영향을 받지 않는 피로 물성치가 필요하게 된다. 피로 물성치를 얻는 과정은 다음과 같다. (2)

1. 많은 종류의 단순 용접시편에 대해 피로 시험을 한 뒤 미가공 자료(raw data) 그래프를 얻는다. 여기에서 미가공 자료 라는 것은 피로 파괴를 일으킬 때의 반복하중과 그때의 수명에 대한 자료이다.

2. 각각의 경우에 대해 피로파괴가 일어나는 힘을 가할 때 용접부위에 작용하는 힘과 모멘트를 유한 요소해석을 통해 구한다.

3. 구해진 용접부에서의 힘과 모멘트를 이용하여 피로 파라미터인 응력을 구한다. 이때 유한요소해석이 선형 탄성해석이기 때문에 각각의 용접 종류에 대해 작용하는 피로 파괴 하중에 대한 피로 파라미터의 비율을 결정할 수 있다.

4. 모든 미가공 자료를 피로 파라미터로 바꾼다.

5. 모든 미가공 자료가 너깃과 박판에 대한 피로 파라미터로 바뀌는지를 평가하여 피로 파라미터의 유효성을 평가한다.

여기에서 중요한 것은 단순 바 쉘 모델은 두개의 피로 데이터가 만들어진다는 것이다. 즉 너

깃과 박판에 대한 자료가 만들어지는데 시편 실험을 할 때 너깃과 박판에서의 파괴를 정확히 구분할 필요가 있다.

3.2 국부구조응력에 기초한 피로 해석 기법

용접부에 힘이 가해질 때 피로 파괴 하중보다 낮은 하중에 대해서도 상당한 소성변형이 국부적으로 일어난다. 이런 변형은 최초의 하중 사이클 동안 일어나고 그 이후 안정화된다. 이런 이유로 유한요소법에 의해 정확히 응력을 계산하는 것은 이런 조건을 반영할 수 없기 때문에 불가능하다. 그러므로 노치에서의 응력을 산출하는 것보다 용접점에서 국부 구조응력을 결정하는 것이 공학적인 면에서 바람직하다.

국부 구조 응력에 기초한 피로 해석 방법에서는 피로에 의한 균열은 점용접 너깃 둘레 박판에서의 균열(cracking in the sheet metal)과 점용접 너깃의 횡단 균열(cracking of the spot weld), 두 가지 경우로 규정하고 있다.

3.2.1 너깃 둘레 박판에서의 균열(1)

너깃 연결점에서의 반경 방향 응력은 점용접을 표현하는 연결 요소에 작용하는 힘과 모멘트로부터 식 (1)에 의해 구할 수 있다. 제시한 식은 탄성 박판에서의 무한 평판의 이론 해로부터 결정된 것으로 각각의 계수는 실험적인 보정값을 반영한 값이다. Fig. 5 에 표현된 연결점 에서의 응력은 식 (1)과 같다. 이 식에서 $\sigma(F_{z1})$ 에서는 인장 축방향력에 대해서만 너깃에 손상을 입힌다는 가정이 전제되어 있다. 여기서 t 는 박판의 두께이며, d 는 점용접 너깃의 지름이다. 연결 요소에서 산출되는 평면방향 전단력(in-plane shear force) $F_x, F_y,$

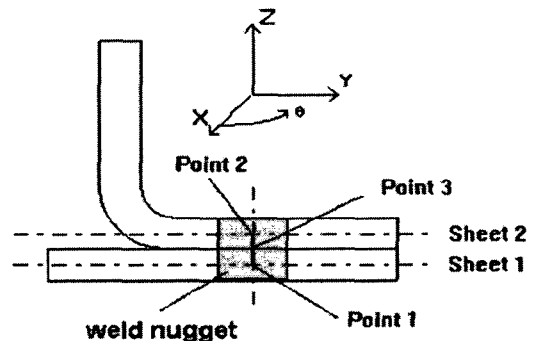


Fig. 5 Coordinate system for a spot weld structure

$$\sigma_{\text{radial}1} = -\sigma(F_{x1})\cos\theta - \sigma(F_{y1})\sin\theta + \sigma(F_{z1}) + \sigma(M_{x1})\sin\theta - \sigma(M_{y1})\cos\theta$$

with $\sigma(F_{x1}) = \frac{1}{\pi dt_1} F_{x1}$, $\sigma(F_{y1}) = \frac{1}{\pi dt_1} F_{y1}$ (1)

$$\sigma(F_{z1}) = \begin{cases} \kappa \frac{1.744}{t_1^2} F_{z1} & \text{for } F_{z1} > 0 \\ 0 & \text{for otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma(M_{x1}) = \kappa \frac{1.872}{dt_1^2} M_{x1}, \quad \sigma(M_{y1}) = \kappa \frac{1.872}{dt_1^2} M_{y1}$$

축방향 힘 F_z , 굽힘 모멘트 M_x, M_y 는 해당 박판에서의 중립면에서 구해진다. κ 는 굽힘력에 의한 치수/응력-구배에 대한 보정 계수로, 일반적인 철강 재료인 경우 $\kappa = 0.6\sqrt{t}$ 이 기본값으로 사용된다. 제시한 식에는 연결 요소에서의 비틀림(M_z)에 의한 효과는 고려되지 않았다. 실제 점용접 구조물의 경우 일정 간격으로 점용접이 이루어지므로, 단일 점용접이 아닌 다점 용접이 이루어진 구조물의 경우에 각 용접점에서의 비틀림에 의한 영향은 크게 고려하지 않아도 무방하다.

너깃 연결점에서의 반경 방향 응력 σ_{radial} 은 이들 힘, 모멘트와 각도의 함수로 주어지며, 너깃 연결점에서의 반경 방향 응력이 최대가 되는 각도가 점용접부의 피로 균열이 가장 발생하기 쉬운 점으로 인지된다. 맞은편 연결점에 대해서도 위에 제시한 식에 의해 유사한 방법으로 용접점에서의 반경 방향의 굽부 응력을 산출할 수 있다.

일반적으로 상용 피로 해석 소프트웨어에서는 응력에 기초한 임계 평면법(stress based-critical plane method)을 사용하여 10 도나 20 도 정도씩 변화시켜 가면서 반경 방향 최대 응력값을 구하며, 최대 반경 방향 응력값만이 피로 해석 관점에서 의미가 있다.

3.2.2 점용접 너깃의 횡단 균열⁽¹⁾

너깃 횡단 균열을 예측하기 위한 응력 산출은 앞서 소개한 용접점에서의 굽부 응력 산출과는 차이점을 보인다. Fig. 5 에 제시된 연결 요소의 중앙점을 3 번 연결점이라 정의하면, 이 점에서의 너깃의 횡단 균열을 예측하기 위한 응력은 식 (2)에 의해 계산된다. 여기서 d 는 점용접 너깃의 지름이며, 사용된 힘과 모멘트는 용접 연결의 중앙부에서 산출된 값이다.

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\sigma = \sigma(F_{z3}) + \sigma(M_{x3})\sin\theta - \sigma(M_{y3})\cos\theta$$

$$\tau = \tau(F_{x3})\sin^2\theta + \tau(F_{y3})\cos^2\theta$$

with $\tau(F_{x3}) = \frac{16}{3\pi d^2} F_{x3}$, $\tau(F_{y3}) = \frac{16}{3\pi d^2} F_{y3}$

$$\sigma(F_{z3}) = \begin{cases} \frac{4}{\pi d^2} F_{z3} & \text{for } F_{z3} > 0 \\ 0 & \text{for otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma(M_{x3}) = \frac{32}{\pi d^2} M_{x3}, \quad \sigma(M_{y3}) = \frac{32}{\pi d^2} M_{y3}$$

where $F_{x3} = F_{x1}$, $F_{y3} = F_{y1}$, $F_{z3} = F_{z1}$

$$M_{x3} = \frac{M_{x1}t_2 - M_{x2}t_1}{t_1 + t_2}, \quad M_{y3} = \frac{M_{y1}t_2 - M_{y2}t_1}{t_1 + t_2}$$

용접의 피로 파단 양상을 살펴보면 점용접이 적절하게 이루어진 경우 점용접 너깃의 횡단 균열은 매우 드물게 발생한다. 따라서 많은 용접점이 포함된 경우에는 너깃 횡단 균열을 생략하고 해석하는 경우도 있다.

3.2.3 점용접에서 손상도의 산출

단일 용접점에서의 피로 손상도(fatigue damage)를 산출하기 위해 각도의 간격을 10 도씩 하는 경우, 각도 변화에 따라 두 박판에서의 용접점에서의 반경 방향 굽부 구조 응력값과 용접 너깃에서의 응력이 요구된다. 이들 값의 변화를 살펴보고 이 중에서 최대 응력값을 산출하여야 하는데, 한 개의 용접점에 대한 최대 응력값을 산출하기 위해 소요되는 계산 횟수는 108 번의 계산이 요구된다. 점용접부의 손상도는 주어진 피로 하중에 대해 각각의 응력 수준을 점용접부의 수명 선도에 의해 상응되는 값으로 결정되며, 일반적인 선형 누적 손상 법칙(Miner's linear damage rule)을 통해 주어진 피로 하중에 대한 관심 용접부의 손상도와 수명을 결정한다.

단순 바-셀 요소 형태의 점용접부의 표현으로부터 얻은 해석 결과는 각 용접점에 대해 너깃 둘레의 각도 변화에 따라 응력 분포가 설정된다. 따라서 손상도가 높게 산출된 점용접 요소에서는 최대 구조 응력이 도출되는 각도 부근에서 피로에 의한 균열이 발생할 가능성이 높음을 예상할 수 있다.

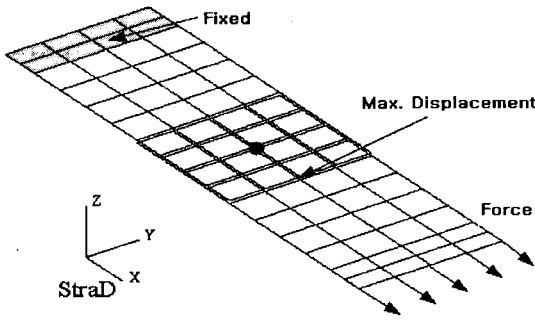


Fig. 6 A tensile shear specimen(TS)

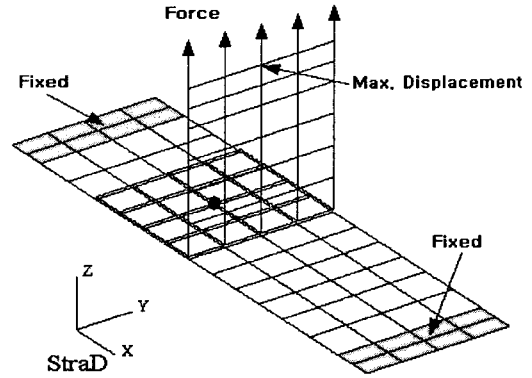


Fig. 7 A coach peel specimen(CP)

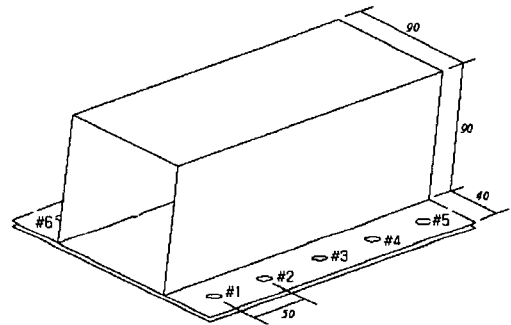
4. 수치해석

4.1 개요

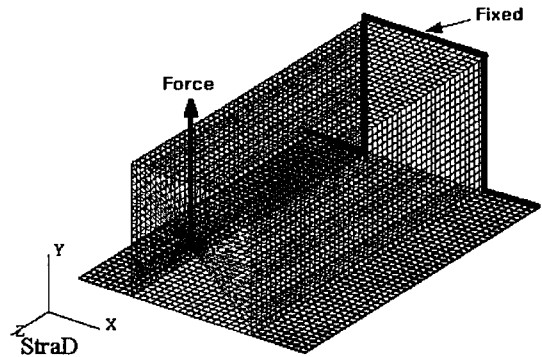
각각의 모델링 기법에 대해 강성을 평가하기 위해 고유 진동수를 비교하고, 내구도를 평가하기 위해 구조응력을 비교한다. 특히 구조응력은 내구도를 구하는 척도이므로 구조응력이 크게 작용할 경우 상대적으로 작은 수명이 예상된다.

사용되는 점용접 모델은 단순 바 셸 모델(SBS), CWELD 용접요소 중 요소와 요소를 연결한 모델(CWELD), 강체 바 스포크 모델(RBS), 너깃을 3차원 유한 요소 모델로 모델링 한 모델(SOLID) 등이다. 사용되는 용접시편으로는 전단 인장 시편(TS), 박리 인장이 주로 가해지는 전단 인장 시편(TS), 박리 인장이 주로 가해지는 박리 인장 시편(CP), 그리고 다점용접의 효과를 확인해 보기 위해 10 개의 점용접이 되어 있는 모자 모양의 시편으로 각각 Fig. 6, 7, 8 과 같다.

너깃의 지름이 강성에 미치는 영향을 알아보기 위해 최대 변위와 고유 진동수의 변화를 평가하며 최대 변위를 평가하는 경우 점용접부의 인장-전단강도의 크기가 8000~10000N 임을 고려하여 비교적 강성이 클 것으로 예측되는 인장 전단 시편에 대해서는 5000N 의 힘을 작용시켰으며 강성이 상대적으로 낮을 것이라 예상되는 박리 인장 시편에 대해서는 500N 의 힘을 작용시켰다. 또한 고유 진동수는 시편을 구속시키지 않은 상태에서 수치 실험을 수행하였으며 강체 모델을 제외한 가장 작은 고유 진동수를 비교하였다. 경계 조건과 힘의 방향은 각각 Fig. 6, 7, 8 에 표시된 것과 같다. 너깃의 최대 변위를 계산 하는 위치는 각각의 시편에서 최대 변위가 발생하는 곳으로 인장 전단 시편의 경우 셸 요소의 자유단 부분이며 박리 인장 시편의 경우 힘이 가해지는 부분이다.



(a) CAD model



(b) Finite element model

Fig. 8 A multi-spot welded hat specimen

박판의 두께 변화에 대한 용접 모델의 강성을 평가 하기 위해서 모델의 전반적인 강도를 평가할 수 있는 고유 진동수를 비교하며 구조응력의 평가는 내구 해석과 관련되어 있으므로 단위 하중을 가하고 구조응력을 비교한다.

4.2 강성에 미치는 너깃 지름에 대한 영향

실체의 점용접 구조물에서 너깃의 지름은 구조의 강성에 영향을 주지 않는 것으로 알려져

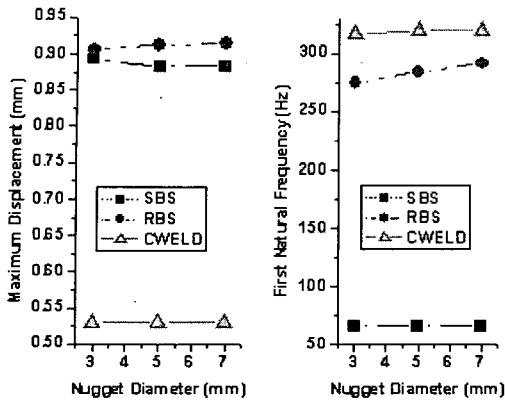


Fig. 9 Maximum displacement and natural frequency for TS specimen according to the variation of a nugget diameter

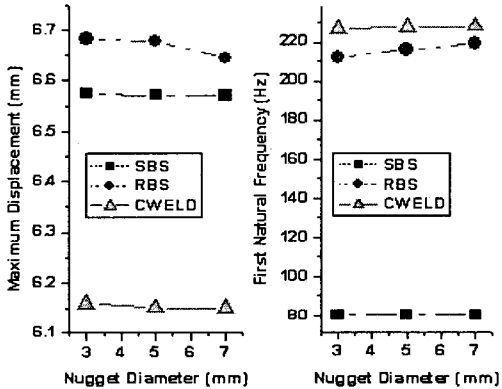


Fig. 10 Maximum displacement and natural frequency for CP specimen according to the variation of a nugget diameter

있다.⁽⁷⁾ 그러므로 먼저 너깃을 간략하게 표현한 SBS, RBS, CWELD 모델이 이런 현상을 잘 반영하는지 평가한다. 사용된 시편은 인장 전단 시편과 박리 인장 시편이고 그 결과를 Fig. 9 와 Fig. 10 에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 사용된 모든 모델은 전반적으로 최대 변위와 고유 진동수에서 너깃의 지름에 따라 값의 변화가 상당히 작은 것을 확인할 수 있고 이것은 실제 현상과도 잘 일치 한다고 할 수 있다.

4.3 박판의 두께에 따른 용접 모델의 강성 평가

4.2 절에서 너깃의 지름 변화가 강성에 거의 영향을 미치지 않는다는 사실을 확인했으므로 너깃의 지름을 실제 구조물에서 많이 사용되는 크기인 5mm 로 가정하고 박판의 두께 변화에 대한 강성을 비교하였다. 강성을 비교하기 위해 각각의 용접 시편에 대해 가장 낮은 고유 진동수를 비교해 보았다. Table 1 은 전단 인장시편, Table 2 는 박리 인장 시편, Table 3 은

Table 1 Comparison of the first natural frequency for a tensile shear specimen (Hz)

Shell depth	0.7mm	1.0mm	1.5mm
SBS	66.135	66.132	66.122
RBS	201.580	284.445	416.087
CWELD	224.230	319.467	474.668
SOLID	193.891	273.315	398.213

Table 2 Comparison of the first natural frequency for a coach peel specimen(Hz)

Shell depth	0.7mm	1.0mm	1.5mm
SBS	80.221	80.453	80.689
RBS	152.779	215.962	317.151
CWELD	159.857	227.848	338.278
SOLID	147.972	209.064	305.910

Table 3 Comparison of the first natural frequency for a multi-spot welded hat specimen (Hz)

Shell depth	0.7mm	1.0mm	1.5mm
SBS	146.986	209.343	311.955
RBS	149.752	213.307	317.791
CWELD	153.984	219.932	329.259
SOLID	153.279	218.808	327.497

모자 모양의 다점용접 시편에 대한 결과를 용접 모델링 방법에 따라 나타낸 것이다.

먼저 박판의 두께가 증가하면서 고유 진동수가 증가 하는 경향을 확인할 수 있다. 단일 점용접 시편의 경우 SBS 의 고유 진동수에 변화가 거의 없는 것은 다른 모델링 방법들과는 달리 구해진 모드가 바 요소에 대한 회전을 나타내는 모드가 되었기 때문이다. 모든 시편에 대해 CWELD 모델을 사용하였을 경우 가장 높은 고유 진동수를 얻을 수 있었다. 실제의 점용접 너깃과 기하학적으로 가장 유사한 SOLID 모델을 기준으로 보면 단일 점용접 시편의 경우 RBS 모델이 CWELD 모델에 비해 좀더 SOLID 모델에 가까운 값을 주지만 실제의 구조물을 잘 반영하는 다점용접 시편의 경우 CWELD 모델의 오차는 1% 내로 매우 작은 것을 알 수 있다. 그러므로 점용접부의 강성을 모델링 하기 위해 너깃을 단순하게 모델링 한 RBS 모델이나 CWELD 모델을 사용해도 강성을 표현하기에 충분하다는 것을 알 수 있다.

4.4 박판의 두께에 따른 구조 응력 비교

각각의 시편에 대해 구조 응력을 구하기 위해 너깃을 모델링 하는 바 요소에서의 힘과 모멘트를 이용하여 SBS, RBS, CWELD 에 대해 최대 구조

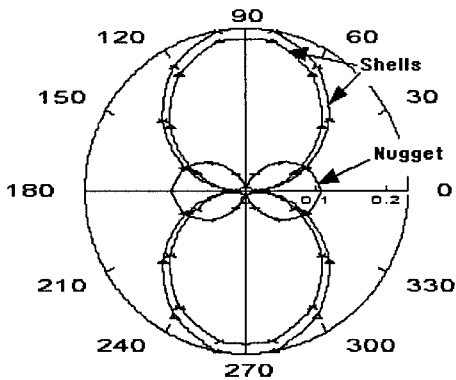


Fig. 11 Distribution of structural stresses at the spot weld in case a TS specimen($t=1.0\text{mm}$, $d=5.0\text{mm}$)

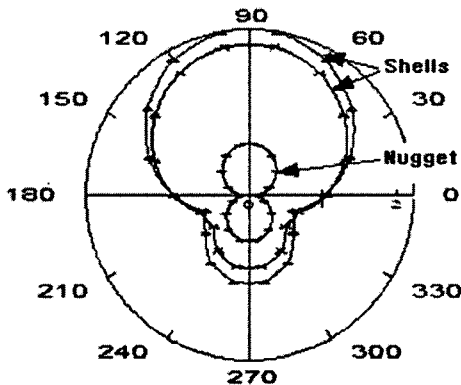


Fig. 12 Distribution of structural stresses at the spot weld in case a CP specimen($t=1.0\text{mm}$, $d=5.0\text{mm}$)

응력을 구하였다. 너깃에 접한 박판의 경우 식 (1)을 이용하며 너깃에서의 구조응력은 식 (2)를 사용한다. 구조응력은 $\theta = 10^\circ$ 간격으로 너깃과 박판에서 각각 36 번씩 계산되며 전단 인장 시편과 박리 인장 시편에 대해 각각 Fig.11 과 Fig. 12 에 나타내었다. 두 그림에서 특징적인 것은 셸요소에 걸리는 구조응력이 너깃에 걸리는 구조응력에 비해 훨씬 크다는 것이다. 이것은 3.2.2 절에서 너깃을 횡단하는 균열이 드물게 일어난다는 현상을 잘 반영하는 것으로 너깃부의 피로 특성이 취약하더라도 너깃부에 걸리는 구조응력이 박판에 비해 상대적으로 작기 때문에 너깃의 횡단균열은 잘 일어나지 않는다고 할 수 있다.

이와 같이 계산된 구조응력 값들 중 가장 큰 값을 표에 정리하였다. 계산된 최대 응력은 너깃에서 보다 박판에서 더 컸으며 모든 경우 이런 경향을 보였다. Table 4 는 전단 인장시편, Table 5 는 박리 인장 시편, Table 6 은 모자 모양의 다점용접 시편에 대한 결과를 용접 모델링 방법에 따라 나타낸 것이다. 전반적으로 SBS, RBS CWELD 순으로 구조 응력이 높게 계산되는 것을 확인할 수

Table 4 Comparison of structural stresses for a tensile shear specimen (MPa)

Shell depth	0.7mm	1.0mm	1.5mm
SBS	0.2421	0.2301	0.1457
RBS	0.2421	0.2301	0.1457
CWELD	0.2434	0.2304	0.1466

Table 5 Comparison of structural stresses for a coach peel specimen(MPa)

Shell depth	0.7mm	1.0mm	1.5mm
SBS	3.451	2.262	1.093
RBS	3.528	2.304	1.102
CWELD	3.799	2.443	1.318

Table 6 Comparison of structural stresses for a multi-spot welded hat specimen (MPa)

Shell depth	0.7mm	1.0mm	1.5mm
SBS	0.04111	0.03206	0.02413
RBS	0.04293	0.03355	0.02531
CWELD	0.04572	0.03587	0.02719

있다. 이는 달리 말하면 CWELD 요소로 모델링을 할 경우 가장 보수적인 수명이 나온다는 것을 의미한다.

4.5 결과에 대한 고찰

다양한 용접 시편에 대해 수치실험을 한 결과 점용접을 단순화 하기 위해 사용된 SBS, RBS, CWELD 모델링 방법들은 모두 용접 너깃의 지름에 상관없이 거의 일정한 최대 변위 및 고유 진동수를 보였으며 이는 실제의 실험과도 일치하는 것이다. 이런 사실을 바탕으로 너깃의 지름을 5mm로 고정하고 박판의 두께를 바꾸어 가며 강성을 비교를 해본 결과 모든 용접 시편에 대해 CWELD 모델링 기법이 가장 높은 강성을 주었고 실제의 용접 구조물과 유사한 다점 용접시편의 경우 CWELD 모델링 기법이 용접 너깃의 기하학적 형상을 가장 잘 반영하는 SOLID 모델과 거의 같은 강성을 주었다. 이것은 너깃을 강성 측면에서 모델링 하는데 SBS, RBS, CWELD 모델을 사용해도 너깃을 3 차원 요소로 모델링 하는 것에 비해 손색이 없음을 나타내는 것이다.

내구도 측면에서는 비교를 위해 먼저 SOLID 모델링 방법을 제외한 나머지 모델에 대해서만 비교를 하였다. SOLID 모델을 제외한 이유는 3 차원 유한요소로 모델링 된 너깃부에서는 구조응력을 구하는데 필요한 힘과 모멘트를 얻을 수 없기 때

문이며 내구도를 평가하기 위해 경험식이 포함되어 만들어진 구조응력과 SOLID 모델의 유한 요소 해석으로부터 나오는 응력을 직접 비교하는 것은 의미가 없기 때문이다. Rupp 이 제안한 방법에 기초하여 내구도를 평가하기 위해 구조응력을 구하였고 SBS, RBS, CWELD 순으로 구조 응력이 높게 계산되었다. 그러므로 CWELD 로 모델링 할 경우 다른 모델링 방법에 비해 내구도 면에서 보수적인 설계를 할 수 있다는 것을 뜻한다.

모델링 측면에서 좀더 생각해 보면 현재 사용된 용접 시편들은 모두 위 아래 박판이 합동인 형태로 만들어졌다. 그러나 실제 상황에서는 이런 모델링을 하기가 거의 불가능하다. 그러므로 좀더 유연한 모델링을 한다는 측면에서 CWELD 방법이 우수하다고 할 수 있다. 자세히 말하면 SBS 는 너깃이 수직으로 연결되게 하기 위해 반드시 한쪽 박판의 절점을 다른 쪽 박판에 투영시켰을 때 그 자리에 절점이 있어야만 가능하다. 만약 수직성을 보장할 수 없을 경우 너깃을 모델링 하는 바 요소에서의 반력과 모멘트가 올바르게 구해질 수 없다. RBS 의 경우는 너깃 모양을 표현하고 강체 요소로 연결해야 하기 때문에 모델링 관점에서는 더욱 불리하다. 그러나 CWELD 의 경우 요소와 요소를 수직으로 연결하기가 훨씬 수월하기 때문에 SBS 가 가지고 있는 문제점을 쉽게 해결할 수 있다.

5. 결론

다양한 용접시편에 대해 수치 실험을 수행한 결과 CWELD 모델링 방법은 강성 측면에서 다른 모델링 방법들과 비슷하거나 높은 값을 보였고 내구도 측면에서는 다른 방법에 비해 약간 더 보수적인 결과를 주는 것을 확인하였다. 피로파괴 현상과 같이 불확실성이 큰 경우 어느 정도 보수적인 설계는 이점을 가지고 있으므로 CWELD 로 점 용접을 모델링 하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있다.

또한 다른 모델링 기법들에 비해 모델링의 편의성이 뛰어나며 너깃을 표현하는 바의 수직성을 유지하기가 훨씬 쉽기 때문에 바 요소에서의 반력과 모멘트를 좀더 올바르게 구할 수 있다. 그러므로 Rupp 의 이론에 근거하여 내구도를 평가하고자 할 때 CWELD 요소가 비교된 모델링 방법 중 가장 우수하다고 할 수 있다.

참고문헌

- (1) Rupp A., Storzel K. and Grubisic V., 1995, "Computer Aided Dimensioning of Spot-Welded Automotive Structures," *SAE Technical Paper* 950711.
- (2) Mayer, A., Haidann, J., Meinhart, H. and Kepplinger, G., 1999, "Theoretical Fatigue Life Estimation as a Tool for Vehicle Body Development," *SAE Technical Paper* 1999-01-3151.
- (3) Gao, Y., Chucas, D., Lewis, C. and McGregor, I., 2001, "Review of CAE Fatigue Analysis Techniques for Spot-Welded High Strength Steel Automotive Structures," *SAE Technical Paper* 2001-01-0835.
- (4) Sheppard, S. and Strange, M., 1992, "Fatigue Life Estimation in Resistance Spot Welds : Initiation and Early Growth Phase," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 531~549.
- (5) Song-In Lee, Il-Hyun Kwun, Byum-Jun Lee and Hyo-Sun Yu, 2001, "A Study of Fatigue Life Prediction for Automotive Spot Weldment Using Local Strain Approach," *Trans. Of the KSME, A*, Vol. 25, No. 2, pp. 220~227.
- (6) Deng, X., Chen, W. and Shi, G., 2000, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Mechanical Behavior of Spot Welds," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 35, pp. 17~39.
- (7) Palmonella, M., Friswell, M. I., Mottershead, J. E. and Lees, A. W., 2004, "Guidelines for the Implementation of the CWELD and ACM2 Spot Weld Models in Structural Dynamics," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, pp. 193~210.
- (8) FE-Fatigue On-line Theory manual v.5.3, *nCode International*, 2002.
- (9) MSC. Nastran 2001 Quick Reference Manual, *MSC software*.