

점용접부가 폐단면 박판 부재의 강성에 미치는 영향

김진곤† · 박용국*

(원고접수일 : 2004년 2월 23일, 심사완료일 : 2004년 5월 20일)

The Effect of Spot Welding on the Stiffness of Closed Thin-Walled Members

Jin-Gon Kim† · Yong-Kuk Park*

Abstract : For engineers in the industry, this study considers a reliable and practical finite element modeling technique to estimate the behavior of closed thin-walled members with spot weldings. Dynamic and static experiments confirm that the technique - modeling the spot weldings with solid elements which have the adjusted rotational freedoms and fill the welding space - yields satisfactory results. Numerical studies on the double hat-shaped members, adopting this modeling technique, show the effect of the spot welding pitch and the spot welding location in the flange on the stiffness of the members. Using the principal stiffness and newly proposed GSPI(global stiffness performance index), we also carefully examine how the spot welding, curvature, and sectional shape, etc., synthetically influence the stiffness of a real excavator pillar in the field.

Key words : Spot welding(점용접), Closed thin-walled member(폐단면 박판 부재), Finite element analysis(유한요소해석), Principal stiffness(주강성), Global stiffness performance index(전체강성성능지수)

1. 서 론

박판 구조물은 산업이 고급화, 경량화 됨에 따라 그 중요성이 점차 커지고 있다. 그 활용도 항공기, 자동차, 중장비, 철도차량 및 선박 등 산업전반에 걸쳐 광범위하게 이루어지고 있다. 특히 박판 부재는 수송용 차량 및 중장비의 차체 설계 시 필수적인 요소로 자리 잡아 이에 대한 연구가 국

내외적으로 다양하게 수행되고 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

자동차에 사용하는 점용접된 모자형 단면형상의 사이드 부재는 충돌 시 많은 에너지를 흡수하여야 하므로 충분히 큰 강성을 가져야 한다. 또한 굴삭기와 같이 다양한 작업 환경에서 운전되는 기계 구조물도 박판 부재로 이루어진 필라가 충분한 강성을 가지지 않으면, 브레이킹 작업과 같은 반복적 충격하중 등에 의해 필라의 점 용접부 부근에

† 책임저자(대구가톨릭대학교 기계자동차공학부), E-mail : kimjg1@cu.ac.kr, Tel : 053)850-2711

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

서 균열과 같은 구조적 문제점이 종종 발생하게 된다. 굴삭기 필라의 설계 및 제조 시 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 방안이 제시될 수 있다. 그 중에서도 단면의 형상, 점용접부의 간격, 용접 위치 그리고 용접부의 크기 등의 다양한 설계 변수에 따라 굴삭기 캡 프레임의 구조적 특성치, 특히 강성이 어떻게 변화하는지 정확하게 예측할 수 있어야 할 것이다.

이러한 수송용 기계 등에 널리 사용되는 점용접부를 가지는 박판 부재의 여러 설계변수에 따른 강성을 올바르게 평가하기 위해서는, 설계자들이 신뢰를 가지고 쉽게 해석할 수 있는 유한요소 모델링 기법이 우선 마련되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 점용접부를 가지는 간단한 실험모델들을 제작하여 점용접부 부근에서의 응력실험과 더불어 전체 구조의 특성을 파악하기 위한 자유진동 실험을 수행하였다. 실험과의 비교검증을 통하여 실용 가능한 점용접부 모델링기법을 제안하고자 하였다. 다음으로, 마련된 점용접부의 모델링 기법을 바탕으로 점용접부의 간격과 플랜지에서의 용접 위치에 따른 모자형 부재의 역학적 거동을 살펴봄으로써, 점용접부가 부재에 미치는 영향을 고찰하였다. 마지막으로 굴삭기에서 실제 사용되는 폐단면 박판 부재에서 단면의 형상, 용접 개수, 용접부 위치와 곡률 등에 의한 구조의 역학적 특성을 종합적으로 평가할 수 있는 전체강성성능지수(GSPI: global stiffness performance index)를 제안하여, 그 타당성을 살펴보았다.

2. 점 용접부 단순 모델링 기법 연구

본 장에서는 박판 부재의 점 용접부 모델링 기법에 대해 다루고자 한다. 점용접부의 정확한 거동을 예측하기 위해서는 잔류응력의 고려, 결합에 의한 비선형 거동 등을 고려한 상세한 해석을 수행하여야 한다. 그러나 이러한 방법은 해석시간이 많이 걸리고 여러 복잡한 현상의 고려로 인해 CAE(computer aided engineering) 전문가들이 아닌 현장 실무에 종사하는 설계자들이 손쉽게 접근하기 어려운 단점들이 있다.

이러한 이유로 현재 용접부 모델링에 있어서 가장 많이 사용되는 간단한 모델링 방법은 점 용접부의 중앙 절점 사이를 하나의 강체 요소로 연결하는 방법이다. 그러나 점 용접부는 완전한 강 결합이 아닌 어느 정도의 강성과 감쇠를 갖는 연결 부분이다. 그럼에도 불구하고 저차 모드 시에 감쇠보다는 점 용접부의 강성이 고유 진동수나 모드에 결정적인 영향을 미친다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 직경 d 를 가지는 점 용접부를 8절점을 가지는 육면체 요소를 사용하여 모델링하는 기법을 사용하였다^[4]. 해석에 사용된 NASTRAN에서는 판요소와 3차원 솔리드요소는 각각의 절점에서 서로 다른 자유도를 가지므로, 결합부에서 솔리드요소의 회전자유도를 보정하여 판요소와 연결하였다^[5]. 점용접되는 상판과 하판 부분은 평판 요소를 이용하여 중립면을 따라서 모델링하였으며, 따라서 두 판 사이의 거리는 Fig. 1에 표시된 판의 중립면 사이의 거리 a 와 같다.

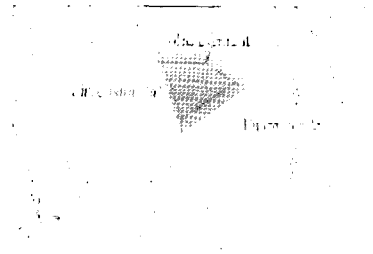


Fig. 1 Finite element modeling of spot-welded plates

3. 모델링기법 검증을 위한 실험

3.1 진동 실험

점용접부를 가지는 구조물의 유한요소 해석결과와 진동실험 결과를 비교하여 제안된 모델링 기법이 해석대상 구조의 전체 강성을 얼마나 잘 평가하는지를 살펴보고자 한다. 이를 위하여 진동모드 실험을 통하여 실험 모델의 고유진동수와 고유모드를 추출하고자 한다. 검증용 모델의 실험장치와 상세한 치수는 Fig. 2와 Fig. 3에 자세히 나타나

있다. 검증용 모델은 점용접부를 가지는 이중모자형 단면부재로서, 실험이 비교적 용이한 양단 자유 경계조건을 선택한다. 실험 시 검증용 모델의 각 절점에 가속도계를 부착하고 충격해머로 나머지 절점들을 차례로 가진하여 주파수응답을 측정한다.

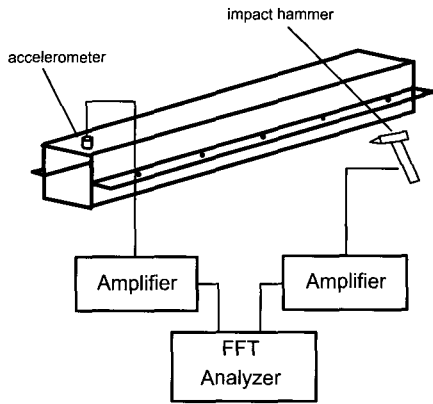


Fig. 2 Dynamic experimental setup for modal analysis(Free-Free Condition)

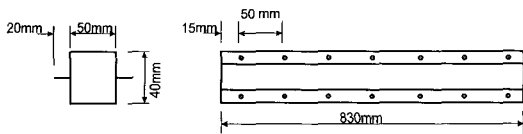


Fig. 3 Geometry of the dynamic test model (thickness=1mm, spot diameter=6mm)

Table 1은 실험과 유한요소해석에 의한 고유진동수 값을 보여주고 있다. 이 결과에서 알 수 있듯, 점용접부를 3차원 솔리드요소로 모델링했을 때 강제요소를 사용하는 경우보다 타당한 국부강성을 가지게 되어 보다 좋은 결과를 얻을 수 있다. 특히 비틀림 모드인 경우, 하나의 강제요소만으로는 정확한 거동을 나타내지 못함을 알 수 있다.

그러나 고유진동수의 비교만으로는 실험과 해석 결과의 진동모드간의 상관도를 확인하기 어렵다. 따라서 Fig. 4에서는 실험모드(ϕ_x)와 점용접부를 솔리드요소로 모델링하여 구한 유한요소 해석모드(ϕ_f)간의 MAC (modal assurance criteria)

값을⁽⁶⁾ 비교하였다. MAC값은 (1)과 같이 정의된다.

Table 1 Natural frequencies from the experiment and the finite element analysis [Hz]

	Experiment	FEM (rigid bar)	FEM (solid element)
1st Bending (up & down)	260	265.5	266
2nd Bending (right & left)	491	467.7	472
Torsion	831	795.2	819

$$MAC(f, x) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n (\phi_x)_j (\phi_f)_j^* \right|^2}{\left(\sum_{j=1}^n (\phi_x)_j (\phi_x)_j^* \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^n (\phi_f)_j (\phi_f)_j^* \right)} \quad (1)$$

Fig. 4와 같이 대각선을 중심으로 1에 가까운 값이 나타나 실험과 유한요소해석간의 결과가 잘 일치하였다. 그러므로 솔리드요소를 이용하여 점용접부를 모델링한 방법이 모델링의 단순함에도 불구하고 구조물의 전체적인 강성을 비교적 잘 평가함을 알 수 있다.

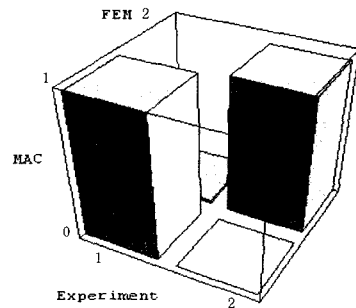
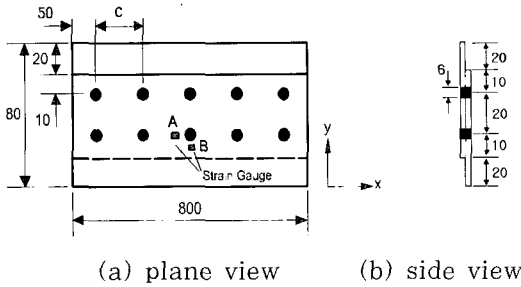


Fig. 4 MAC value. ('FEM' indicates the results from modeling technique using solid elements.)

3.2 국부 응력 실험

본 절에서는 점용접부 주위의 국부 응력에 대한 모델링의 신뢰성을 검증하기 위하여 스트레인 게이지를 이용한 3점 굽힘 실험을 수행한다. 정적실

험을 위해서 MM사의 062RF형의 3요소 직각 로제트를 Fig. 5와 같이 점 용접부의 10mm 둘레에 부착하여 양쪽 끝단에서 50mm 안쪽 부분을 단순 지지시켜 굽힘 실험을 수행하였다. 하중은 왼쪽 지지점에서 175mm 떨어진 지점에 1750g의 하중을 가하였다.



(c) load and support conditions
Fig. 5 Static experimental setup [mm]

점용접부간의 거리 c는 350mm, 175mm 그리고 87.5mm의 세 가지 모델을 제작하여 실험하였다. 실제 폐단면 박판보에 대하여 정적 실험을 수행하여야 하나, 스트레인 게이지로 측정 가능한 변형률을 얻기 어려운 이유로 Fig. 5와 같은 점용접부를 가지는 간단한 모델을 제작하여 실험을 수행하였다. 유한요소해석결과와 실험결과를 쉽게 하기위하여 구해진 변형률 성분으로부터 평면응력문제로 가정하여 다음과 같은 von-Mises 응력을⁽⁷⁾ 계산하였다.

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2)$$

Fig. 6은 점용접부를 강체요소로 모델링한 경우와 3차원 솔리드요소로 모델링한 경우 Fig. 5에

표시된 위치에서의 응력분포를 보여주고 있다. 그림으로부터 솔리드 요소를 사용한 경우 단순한 모델링 기법임에도 불구하고 점용접부 근처에서 실험값의 70 - 90% 정도의 비교적 정확한 응력분포 값을 나타내고 있다.

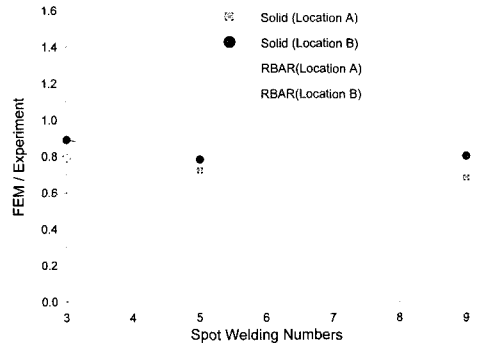


Fig. 6 Von-Mises strains around the spot weldings indicated in Fig. 5

4. 점용접부가 박판 부재 강성에 미치는 영향

4.1 이중모자형 직선부재

전 절에서는 실제 모델링하기가 용이한 회전자유도가 보정된 솔리드요소를 사용한 점용접부의 단순 모델링기법의 신뢰성을 실험과의 비교를 통하여 확인하였다. 본 절에서는 제안된 단순 솔리드 모델링 기법을 실제 점용접부를 가지는 모자형이나 박스형 부재에 적용한 유한요소해석 결과로부터, 점용접부의 간격이나 용접 위치 등이 구조물의 강성에 어떠한 영향을 주는지를 살펴본다.

먼저, Fig. 3과 같은 이중모자형 직선부재에서 용접 간격과 플랜지에서의 점용접 위치의 변화에 따른 부재의 굽힘 강성과 비틀림 강성의 변화를 살펴보았다. 직선부재의 굽힘 강성과 비틀림 강성은 Fig. 7과 같이 하중을 가하여 구하였다.

Fig. 8은 용접 간격에 따른 강성의 변화를 보여준다. 용접 간격은 40mm에서 200mm까지 변화시켰으며, 비틀림 강성이 점용접 간격에 대해서 굽힘 강성보다 보다 큰 영향을 받는다는 것을 알

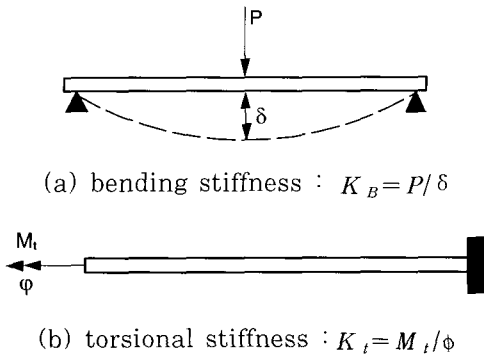


Fig. 7 Calculation of the bending and torsional stiffness in the thin-walled straight beam

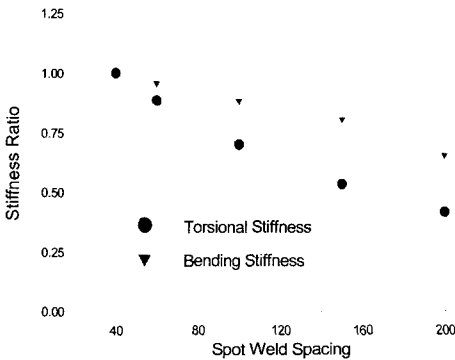


Fig. 8 The stiffness variation to the change of the spot-welding pitch

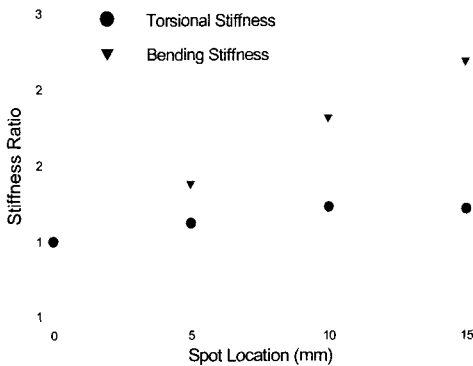


Fig. 9 The stiffness variation to the change of the spot-welding location in the flange

수 있다. Fig. 9에서는 플랜지에서의 용접 위치에 따른 강성의 변화를 살펴보았는데, 용접 위치 0mm는 용접이 너트의 끝단에서 절반만 된 경우

를 의미한다. 이러한 해석결과로부터 용접 간격은 구조물의 비틀림 강성에, 그리고 플랜지에서의 용접 위치는 구조물의 굽힘 강성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 특히 점용접이 바깥쪽에서 이루어지는 경우에는 구조물의 굽힘 강성이 상당히 취약할 수 있으므로, 이러한 경우가 발생하지 않도록 제작 시 주의하여야 한다.

4.2 단일모자형 곡선부재

다음은 Fig. 10과 같은 점용접부를 가지는 단일모자형 곡선부재에서 용접 간격과 용접 위치에 따른 강성의 변화를 살펴본다. 이를 위해 곡선 부재의 한 쪽 끝단을 고정하고, 다른 쪽 끝에 x, y, z 방향의 단위 모멘트 $M(1\text{kg mm}^2/\text{s}^2)$ 을 가한 후 그 점에서 회전량 F 를 구하여 아래와 같이 행렬식을 구할 수 있다.

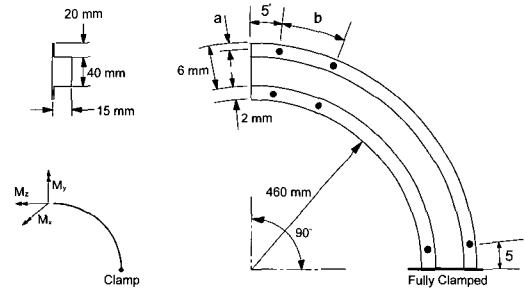


Fig. 10 Geometry of the hat-shaped curved member with spot weldings

$$\{\Phi\} = [C] \{M\} \tag{3}$$

(3)에서 [C]는 전체계의 유연성행렬의 차원을 가지고, 이러한 유연성행렬의 역행렬이 강성행렬이 된다. 점용접부의 간격 b가 5°인 경우의 강성행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.04e^6 & 7.61e^4 & 2.89e^5 \\ & 2.42e^7 & 5.39e^4 \\ \text{Symm.} & & 1.04e^6 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} = [K] \{\Phi\} \tag{4}$$

이러한 강성행렬에 대해 고유치문제를 풀어 다음과 같은 주 강성방향과 값을 구할 수 있다.

$$P_{direction} = \begin{bmatrix} -0.003 & -0.708 & 0.706 \\ -0.999 & 0.004 & -0.001 \\ -0.002 & -0.706 & -0.708 \end{bmatrix} \quad (5a)$$

$$P_{value} = \begin{Bmatrix} 2.42e^7 \\ 1.33e^6 \\ 7.55e^5 \end{Bmatrix} \quad (5b)$$

이와 같이 주 강성값과 방향을 이용하는 것은 통상적으로 잘 알려져 있는 주 응력값과 방향의 개념을⁽⁸⁾ 구조물의 강성 평가에 확장한 것이다. 특히 이와 같이 결정된 주 강성 방향, 특히 최소 주 강성값을 갖는 주 강성방향을 파악하면 역학적으로 가장 취약한 거동을 보이는 방향이 보강되도록 보강재의 위치나 방향을 결정하는데 매우 유용하게 이용될 수 있다. 물론 이 결과를 이용하여 단면 설계를 다시 수행하는 데에도 효과적으로 사용될 수 있다.

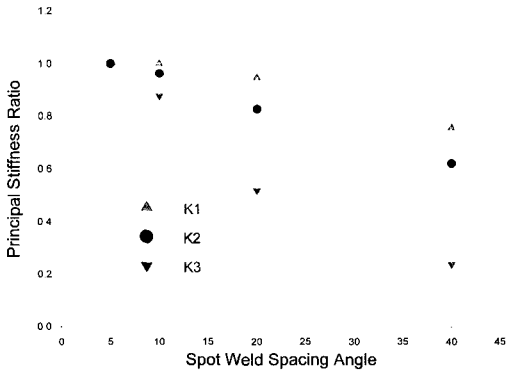


Fig. 11 The stiffness variation to the change of the spot-welding spacing

Fig. 11과 12는 (3)으로부터 구한 주 강성값의 점용접부의 간격과 용접 위치에 따른 변화를 보여주는 그림들이다. 이로부터 점 용접부의 간격이 넓어수록 최소 주 강성값 K_3 가 급격히 감소하고, 용접 위치가 플랜지의 안쪽으로 가까이 위치할수록 최소 주 강성값이 증가함을 잘 알 수 있다. 그

러나 최대 주 강성값 K_1 은 모든 경우에서 K_3 에 비해 상대적으로 변화율이 작음을 확인할 수 있다. 그러므로 실제 설계 시 구조물에서 가장 취약한 최소 주 강성값과 방향을 단면의 형상 및 용접 방법 등을 결정하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

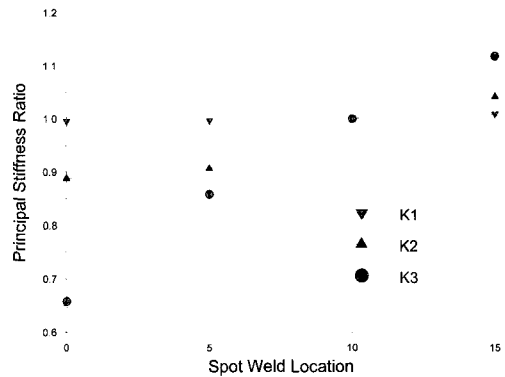


Fig. 12 The stiffness variation to the change of the spot-welding spacing

5. 전체 강성 성능 지수

본 장에서는, 곡률과 용접부를 가지는 Fig. 13과 같은 실제 굴삭기 필라 구조에서 단면의 형상, 용접 간격, 용접부 위치와 곡률 등에 의한 구조의 역학적 특성들을 종합적으로 평가할 수 있는 새로운 전체강성성능지수(GSPI: global stiffness performance index)를 제안하고자 한다.

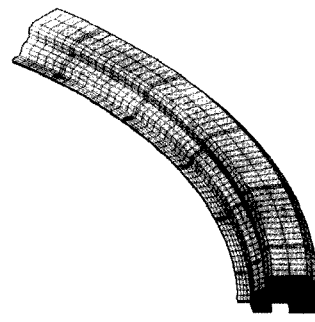


Fig. 13 The finite element modeling of the curved pillar practically used in a excavator

전 절에서 나타난 바와 같이 실제 곡선형 필라 구조에서 필라의 설계 변경에 따른 전체 주 강성 값 (여기서 강성의 물리적 차원은 모멘트/회전각임) 중에서 구조물의 파손에 가장 큰 영향을 주는 최소 전체 주 강성값의 변화율은 최대 전체 주 강성값의 변화율에 비하여 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 또한 완전응력 보(fully stressed beam)의 단면설계 개념과 유사하게^[7] 주 강성값의 최대값이 감소되더라도 최소값을 증가시켜 최대값과 최소값의 차이를 줄이는 것이 바람직한 설계라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 최대 및 최소 주 강성값의 비로 무차원화된 전체 강성 성능 지수를 도입하여 설계에 활용하고자 한다.

$$GSP\!I = \frac{\text{Min. Stiffness}}{\text{Max. Stiffness}} = \frac{(K_{\theta})_{\min}}{(K_{\theta})_{\max}} \quad (6)$$

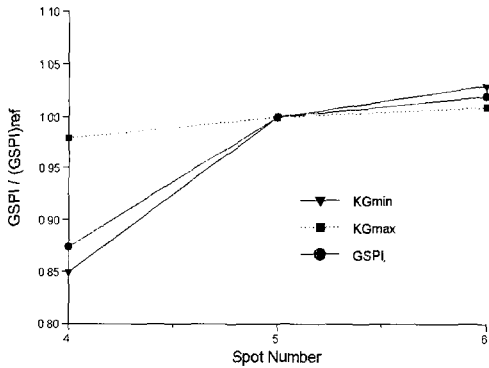


Fig. 14 The variation of GSP/ to the change of the spot-welding pitch

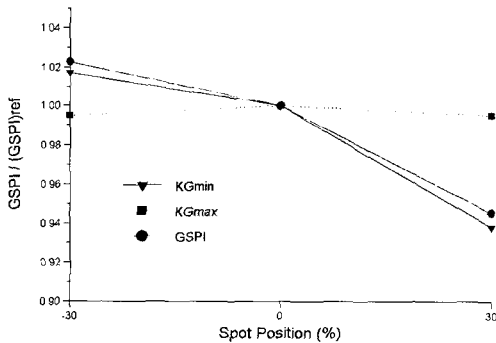


Fig. 15 The variation of GSP/ to the change of the spot-welding position

제안된 전체강성성능지수의 타당성을 검증하기 위하여, 다음과 같은 여러 가지 용접 경우에 대하여 해석을 수행하여 보았다. Fig. 14에서 16은 각각 용접 개수를 변화시켰을 때, 용접 위치를 바꾸었을 때, 그리고 용접부의 크기를 변화시킨 경우들에 대한 필라의 전체 주 강성 값과 전체 강성 성능 지수 값들을 보여주고 있다.

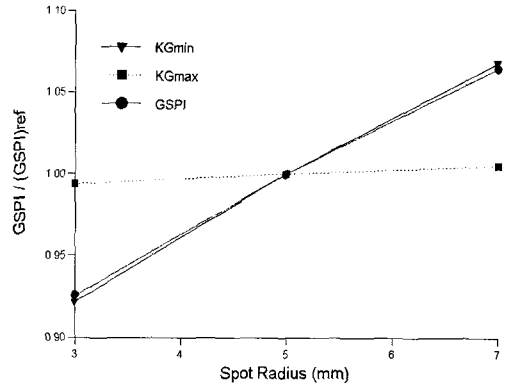


Fig. 16 The variation of GSP/ to the change of the spot-welding radius

6. 결 론

본 연구에서는 점용접부를 가지는 폐단면 박판 보에 적용가능한 실용적인 유한요소모델링 기법을 살펴보고, 정적 및 동적 실험을 수행하여 고려한 유한요소모델링 기법의 신뢰성과 유용성을 검증해 보았다. 연구결과 점용접부를 3차원 솔리드 요소로 단순 모델링한 경우 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

검증된 점용접부 모델링 기법을 적용하여, 점용접부 간격, 위치 등이 점용접부를 가지는 모자형 박판부재의 강성에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 곡률과 용접부를 가지는 실제 굴삭기 필라 구조에서 단면의 형상, 용접부 간격, 위치 및 곡률 등에 의한 구조의 역학적 특성들을 종합적으로 평가할 수 있도록, 최대 및 최소 주 강성값의 비로 무차원화된 전체강성성능지수(GSP/)를 새로이 제안하여 그 유용성을 살펴보았다. 향후 더 다양한 경우에 대한 추가적인 연구와 검증이 이루어진다면 보다 효율적인 새로운 평가기법을 확립할 수

있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 차천석, 김영남, 양인영, "FEM에 의한 점용접된 이중모자형 단면부재의 축방향 압계특성에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제18권, 제7호, pp. 120-126, 2001.
- [2] 차천석, 강중엽, 김영남, 김정호, 김선규, 양인영, "모자형 단면부재의 폭비와 플랜지 용접간격에 따른 압계특성," 대한기계학회논문집(A), 제25권, 제1호, pp. 98-105, 2001.
- [3] 한근조, 안성찬, 심재준, 이현철, 장활수, "면적비와 위치변화가 점용접된 두 사각평판의 좌굴응력에 미치는 영향," 한국정밀공학회지, 제18권, 제12호, pp. 54-59, 2001.
- [4] 김진곤, 박성수, 김윤영, 최석환, 김병권, "볼트결합부가 있는 구조물의 유한요소 모델링 및 실험적 검증," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제6호, pp.1854-1861, 1996.
- [5] M. Reymond, M. Miller, MSC/NASTRAN Quick Reference Guide, The Macneal-Schwendler Corp.
- [6] D. J. Ewins, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., 1984.
- [7] R. C. Hibbeler, Mechanics of Materials, Prentice Hall, 2000.
- [8] W. D. Pilkey, Formulus for Stress, Strain, and Structural Matrices, John Wiley & Sons, Inc., 1994.

저 자 소 개



김진곤 (金辰坤)

1967년 11월생, 1991 서울대학교 기계설계학과 학사, 1993 서울대학교 기계설계학과 석사, 1998 서울대학교 기계설계학과 박사, 1998-2000 삼성 전자 중앙연구소, 2001-현재 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 조교수



박용국 (朴鏞國)

1964년 11월생, 1987 서울대학교 공학사, 1989 University of Michigan (공학석사), 1995 Ohio State University (공학박사), 1996 Ohio State University (Post-Doctoral), 1996-1998 삼성자동차 금형기술연구소, 1998-현재 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 부교수