

Modal Analysis를 통한 용접 구조물의 용접변형에 관한 연구

A Study on Welding Distortion of the Welding Structure through Modal Analysis

장경복*, 김하근*, 강성수*

* 부산대학교대학원

1. 서론

기존의 용접구조물의 용접 공정의 해석에는 열-기계적인 해석(thermo-mechanical analysis)의 커플링이 많이 사용되고 있는데, 이는 막대한 계산시간과 저장용량을 요구하기 때문에 구조물이 대형이고 용접부위가 많을 경우에는 이를 3차원으로 해석하기란 사실상 불가능하다. 그러므로 용접변형을 최소화 하는 용접순서의 선정이 주된 목적일 경우 계산시간과 저장용량을 절감하기 위한 방법으로 유한요소해석 중의 한가지 방법인 모달해석(modal analysis)을 이용하여 구조물의 초기 모우드(mode)에서의 강성(rigidity)의 평가를 통해 변형이 최소가 되는 용접순서를 결정하고자 하였다. 본 연구에서 해석의 예로 제시된 용접품은 단순 용접구조물로서 사각형 튜브섹션(rectangular hollow section) T-joint와 K-joint이다. 일반적으로 용접된 박스형태의 부품(welded box section)은 기존의 구조물 형태에 비해 보다 큰 강도와 강성으로 인해 하중에 대한 변형을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 소형이고 얇은 두께를 가진 용접부의 조인트는 하중이 주 박스부품의 국부적인 단면적에 집중되기 때문에 상대적으로 낮은 하중의 반복되어 증가하는 진동수에서 작용하는 운송 혹은 자동차 부품으로 사용될 수 있다.

2. 해석모델 및 방법

용접구조물로서 사각형 튜브섹션(rectangular hollow section) T-joint의 경우, 매쉬의 형성과정에서 요소의 수는 847개이며 절점은 1678개로 구성하였다. K-joint의 경우는 요소의 수는 1428개이며 절점은 2760개로 구성되며 T와 Y-조인트 사이의 간격은 30mm이고 수평 튜브섹션과 60°의 각도로 기울어져 있다. 치수는 두께가 3mm로 60×40mm의 STS 304 스테인리스강으로 2개(T-joint) 혹은 3개(K-joint)의 동일한 사각형 튜브로 구성된다. 모델의 치수와 형상, 그리고 수평 튜브섹션의 상부 표면에서의 용접의 시점을 Fig. 1에 제시하였다. 요소분할은 3차원 해석에서 일반적으로 사용되는 8개의 절점을 가진 블럭 요소(8 node hexagonal brick element)를 이용하여 구성하였다. 우선 모달해석을 바탕으로 조인트 접합부의 비드를 순차적으로 형성하여 강성이 최대화 되는 순서로 용접순서를 결정하고, 제안된 용접순서를 열-기계적인 해석으로 변형 양상을 검증하였다.

2.1 Modal Analysis

용접구조물의 고유모우드는 완전히 그것의 물리적인 특성(질량, 강성)과 그러한 특성들의 특정한 분포에 의해 결정된다. 각각의 모우드는 고유진동수와 구조물의 모우드형상인 특정변위의 분포패턴과 같은 모달 파라미터의 관점으로 묘사될 수 있다. 본 연구에서는 사각형 튜브섹션(rectangular hollow section) T-joint와 K-joint의 강성을 평가하기 위해 고유진동수(natural frequency)와 모우드형상(mode shape)을 유한요소법으로 해석하였다.

모달해석에 필요한 지배방정식은 아래와 같다.

$$(K - \omega^2 M) \phi = 0 \quad (1)$$

여기서, K: stiffness matrix, M: mass matrix, ω : frequencies(eigenvalues), ϕ : eigenvectors

2.2 Thermo-Mechanical Coupling Analysis

온도분포 해석시 필요한 경계조건으로 먼저 초기에 주어지는 모든 절점에서의 온도를 대기의 온도와 동일하게 20°C로 하였고, 구속조건은 horizontal hollow section의 하부 양쪽통로와 vertical hollow section의 상부 통로를 구속하였으며, 온도에 따른 재료의 물성변화를 고려하여 재료의 기계적 성질인 열팽창 계수와 탄성계수 및 항복응력, 그리고 재료의 열적성질인 비열을 온도에 따른 함수로서 입력하였다. 또한, 열전도과정을 위해 열전달 계수를 온도에 따른 함수로서 입력하였다. 열손실은 주로 대류와 복사에 의해 지배되는 것으로 간주하였으며 열대류 계수를 온도에 따른 함수로서 입력하였고 열전달 해석시 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열(latent heat)에 대한 효과도 고려하였다. 그리고, 열전달과 응력 해석시 재료는 등방성이며, 재료의 항복거동은 폰미세스(von-mises)의 항복조건을 적용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

일반적으로 실제 구조물과 대응할 만한 모우드형상(mode shape)은 주로 초기 모우드를 따르며 구조물이 대형화될수록 모달해석에 필요한 지배방정식에 따라 진동수에서의 차이가 작더라도 질량이 커짐에 따라 강성의 차이는 현저하게 달라지며, 구조물이 비대칭 구조이고 용접패스가 많을수록 진동수의 차이에 크게 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 또한 구속부위의 변화에 따라 구조물 자체의 강성이 달라짐을 확인할 수 있었으며 구속의 정도가 심할수록 구조물의 강성에 기여함을 알 수 있었다.

T-joint의 경우 3패스가 이루어진 상태에서 2가지 용접순서에 대한 모달해석을 바탕으로 강성이 최대화되는 순서로 용접순서를 결정하고, 제안된 용접순서에 따라 열-기계적인 해석으로 최종변형형상을 비교, 제시하였다. 초기 5개의 진동수가 Table 1에서 비교되고 Fig. 2와 Fig. 3에서 첫 번째와 두 번째 모우드를 각각 제시하였다. 첫 번째, 두 번째, 세 번째 모우드는 굽힘모우드(bending mode)를 제시하였으며, 네 번째는 회전모우드(torsion mode)를 나타내었다. 모달해석의 결과에 따르면 sequence 2, 3의 경우가 sequence 1의 경우보다 진동수에서는 크게 차이를 제시하지 못하나 조인트부위의 국부적인 변형이 Fig. 2에서 제시하듯이 sequence 1의 경우가 넓게 분포하며 비대칭형태의 변형양상을 제시한다. 그러므로, 모달해석상으로 용접순서 2와 3(sequence 2, 3)이 1의 경우보다 용접변형상에서 유리한 것으로 판단된다. 이러한 모달해석 결과의 검증을 위해 실제 커플링해석을 3가지의 용접순서에 대해 수행하였다. Fig. 4는 이러한 용접순서 3(sequence 3)에 대한 열사이클을 나타낸 것인데 용접순서가 페루프를 형성함으로 온도가 감소하다가 다소 증가하는 부분이 나타나고 있다.

Fig. 5는 온도가 정상상태에 도달한 후에 전체적인 변형양상을 제시하였다. 주로 용접부와 수평 튜브섹션의 직경에서의 변화가 심함을 확인할 수 있다. 이는 모달해석에서 수평 튜브섹션의 변형양상과 비교해 상표면의 용접부 주위와 양쪽 끝부위의 심한 변형과 비교될 만한 부분이다.

Fig. 6은 수평 튜브섹션의 상부 표면에서 중심라인을 따른 수직변형을 제시하였는데 sequence 3이 상대적인 변형이 가장 작은 것으로 나타나나 sequence 3이 용접변형을 최소로 하는 용접순서인 것으로 판단된다. 이는 동일한 진동수를 제시하더라도 연속적인 용접이 용접순서에서의 단락을 형성하는 경우보다 나은 것으로 판단되며 실용접의 경우 모서리 부위의 용접비드 상태의 향상을

위에서도 연속적인 용접이 나온 것으로 고려된다.

Table 1. Frequencies of each mode shape

Mode	1	2	3	4	5
Frequency of welding sequence 1	50.60	83.39	90.37	101.6	104.1
Frequency of welding sequence 2, 3	51.88	87.62	91.51	101.8	104.3

K-joint의 경우 T-joint의 용접순서를 바탕으로 나머지부위의 용접순서를 결정하였다. 이러한 유한요소해석을 수행한 결과 계산시간의 절감이라는 효과를 얻을 수 있으며 Table 2.에 해석을 완료하기 까지 걸리는 CPU time을 제시하였다.

Table 2. Comparison of CPU time required for analysis

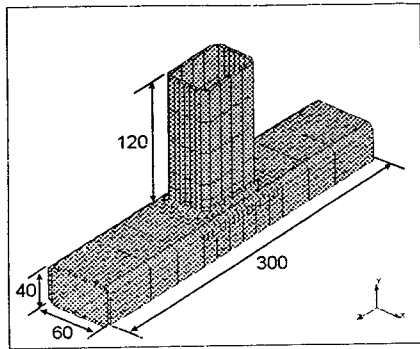
Type of tube section	T - joint		K - joint	
	Modal analysis	Coupling analysis	Modal analysis	Coupling analysis
CPU time(sec)	98.08	7843.51	92.3	19356.1

4. 결론

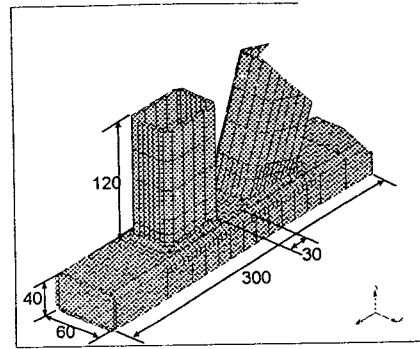
상대적으로 작은 크기의 튜브형상은 용접부의 루트 측면에의 접근이 어렵기 때문에 일정각도로 기울어진 조인트의 용접부에 백킹(backing)이 없이 조인트 부위의 측면에서의 각각의 용접에 의해 용접부가 형성되어야 하고 이러한 튜브형상의 용접부의 조인트를 형성하는데 변형을 최소화하기 위해 용접순서에 따른 변형의 정도를 상대적으로 비교하였다. 결론적으로, 용접변형을 최소화 하기 위한 용접순서를 결정하기 위해 모달해석을 사용할 수 있다. 따라서, 구조물이 대형화될수록 진동수에서의 차이가 작더라도 질량이 커짐에 따라 강성의 차이는 현저하게 달라지며, 구조물이 비대칭 구조이고 용접패스가 많을수록 진동수의 차이에 크게 영향을 미칠 수 있으므로 패널구조물과 같은 대형 구조물에도 적용 가능하리라 판단된다.

5. 참고문헌

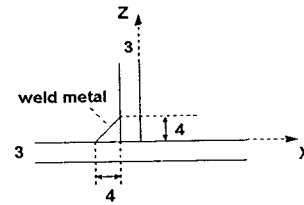
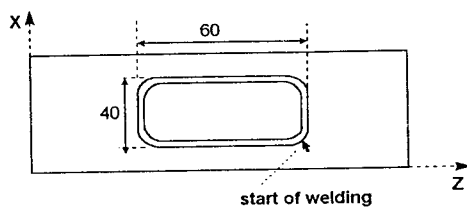
- 1) O. R. MYHR, S. KLOKKEHAUG, A. O. KLUKEN, "Modeling of Microstructure Evolution, Residual Stresses and Distortions in 6082-T6 Aluminum Weldments", AWS, July., 1998, pp. 286-s - 292-s.
- 2) Matti Koskimäki, Errkki Niemi, "Finite Element Studies on the Behaviour of Hollow Section K-Joints", Dep. of Mechanical Engineering, Lappeenranta Uni. of Tech. 1986.
- 3) Leonard P. Connor, "Welding Handbook, 8th edition", AWS.
- 4) Analysis Research Corporation, MARC User Manual.



(a) Rectangular hollow section T-joint



(b) Rectangular hollow section K-joint



(c) Cross section at the upper horizontal surface showing the start position of the weld and weld size

Fig. 1 Schematic diagram of analysis model

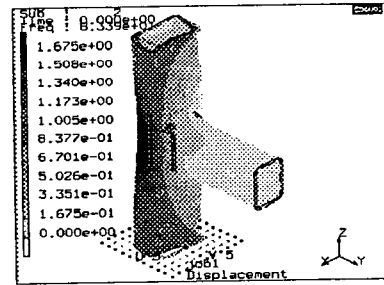
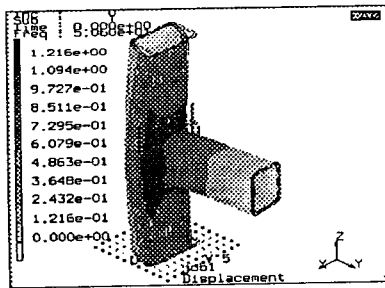


Fig. 2 Deformation distribution through modal analysis of welding sequence 1 (1st mode, 2nd mode)

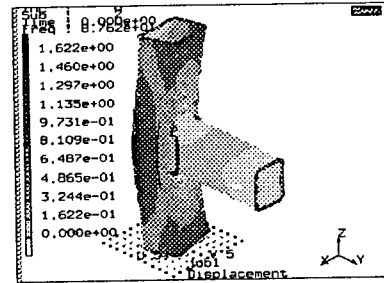
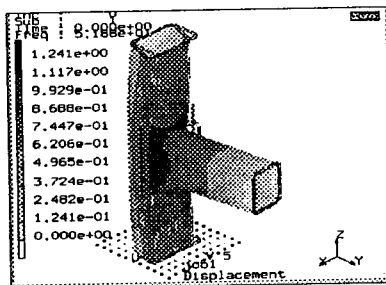


Fig. 3 Deformation distribution through modal analysis of welding sequence 2, 3 (1st mode, 2nd mode)

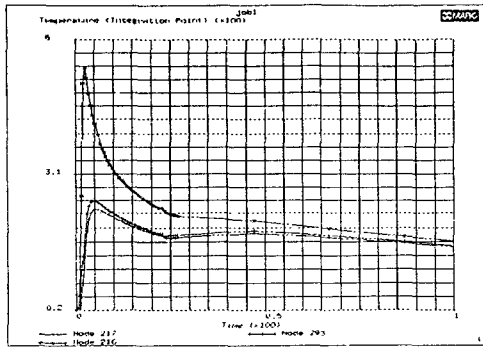


Fig. 4 Thermal cycles at different locations

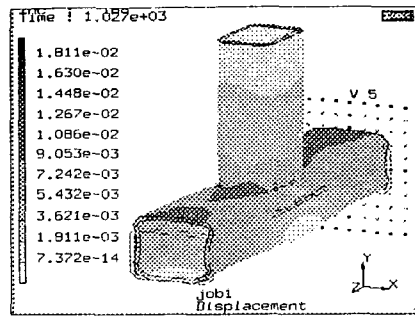
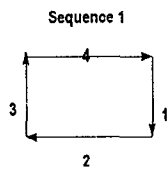
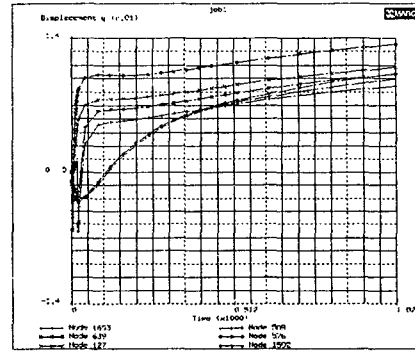
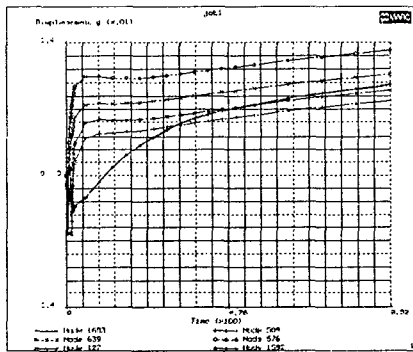
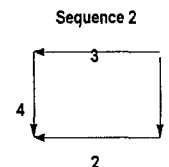


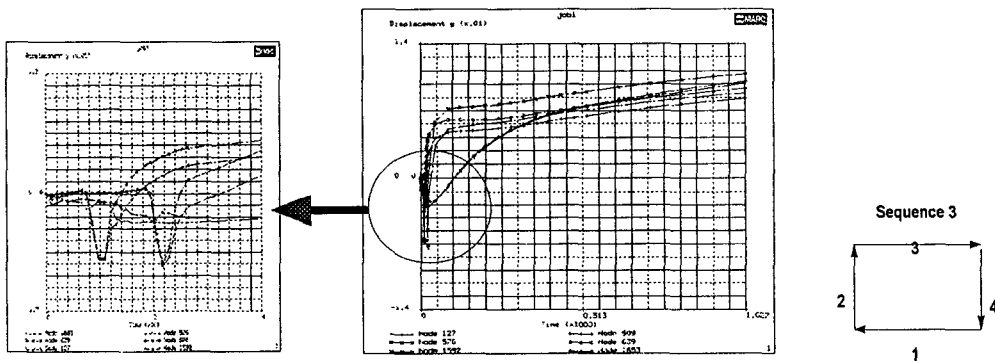
Fig.5 Distortion through the coupling analysis



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Vertical deflections along the center line of the upper surface of the horizontal tube as a function of time