

바이모달 트램 구동축 서브프레임에 적용된 용접 사각관의 굽힘 특성 평가

An Evaluation of Bending Performance of Welded Square Tube Structures for Drive Shaft Sub Frame of BIMODAL Tram

고희영* 신광복†** 이종화*** 김한수***
Ko, Hee-young Shin, Kwang-bok Lee, Jong-hwa Kim, Han-su

ABSTRACT

This paper describes the results of experiments on the bending behavior of welded square tube structures for drive shaft sub frame of BIMODAL Tram. The used specimens to test were two different type made of ATOS60 and ST52-3. The square tube made of ST52-3 is the non-welded structure, while the square tube made of ATOS60 is the welded structure. The welded square tube made of ATOS60 will be applied for drive shaft sub frame of BIMODAL Tram. This welded square tube could reduce the manufacturing cost in comparison of non-welded square tube. The results showed that the bending performance of welded square tube made of ATOS60 was proven, and the bending behavior was in an good agreement with that of nonlinear finite element analysis.

1. 서 론

차량의 전복이나 충돌 시 차체 구조물에 적용되는 부재들의 변형은 축방향 압축 붕괴와 함께 굽힘 붕괴가 혼합되어 변형된 양상을 보여준다. 차량에 적용된 사각관의 대부분은 굽힘 붕괴가 주를 이루며, 이에 대한 연구는 처음으로 Kecman에 의해서 이루어졌다[1]. 일반적인 굽힘 시험 방법은 단순지지보 형태와 외팔보 형태로서 많은 이용되고 있다. 그러나 단순지지보 형태는 하중을 가하는 장치가 소성 힌지가 발생하는 것을 방해하기 때문에 붕괴이후 거동을 실험하기에 적당하지 않으며, 외팔보 형태는 고정단에서의 전단응력 발생으로 인해 정확한 결과를 얻기가 힘들다. 이러한 방법을 보완하기 위해 4점 굽힘 시험 방법이 이용되었으며, 새로운 굽힘 시험 장치를 개발하기도 하였다[2-3]. 또한 사각관 보의 굽힘 특성을 높이기 위한 연구로서 보강재를 적용한 사각관에 대해 좌굴변형에 의한 거동을 시험과 해석적 기법을 통해 비교하였다[4]. 이처럼 구조물에 적용된 사각관의 굽힘 특성에 관한 연구들이 이루어지고 있다. 현재 국토해양부의 국가교통핵심기술개발사업의 일환으로 연구 개발 중인 바이모달 트램의 구동축 서브 프레임에 적용될 예정인 사각관은 연구개발에 대한 제작비용의 절감과 국내 생산을 위해 용접된 사각관을 적용할 예정이다. 따라서, 본 연구에서는 용접된 사각관에 대한 굽힘 시험을 통해 특성을 평가하고자 한다. 이때, 국외에서 현재 운행 중인 굴절버스에 적용된 사각관의 굽힘 시험을 같이 수행하여 바이모달 트램에 적용된 용접된 사각관과의 굽힘 특성을 비교하였다. 또한 비선형 유한요소 해석을 통하여 용접된 사각관에 대한 굽힘 해석을 수행하여 시험 결과와 비교하였다.

* 한밭대학교, 기계설계공학과, 경량구조 및 CAE 실험실

†** 교신저자, 한밭대학교, 기계설계공학과

E-mail : shin955@hanbat.ac.kr

TEL : (042)821-1156 FAX : (042)821-1587

*** (주)우진산전

2. 굽힘 시험

2.1 굽힘 시험 방법

사각관 굽힘 시험(flexural test)은 Instron 4482를 사용하여 3점 시험을 수행하였고, 변위제어는 3.5 mm/min로 설정하였다. 또한, 접촉식 변위센서(CDP-50)와 동적측정장비(DC-204R)를 사용하여 굽힘에 의한 처짐을 측정하였다. 그림 1은 시험에 사용된 시험장치 및 변위 센서를 보여주며, 그림 2는 굽힘 시험에 사용된 사각관의 길이와 지지대 사이의 거리를 보여준다. 이때, 사각관의 총 길이는 700 mm 이고, 지지대 사이의 거리는 600 mm이다.



그림 1. 굽힘 시험 장치

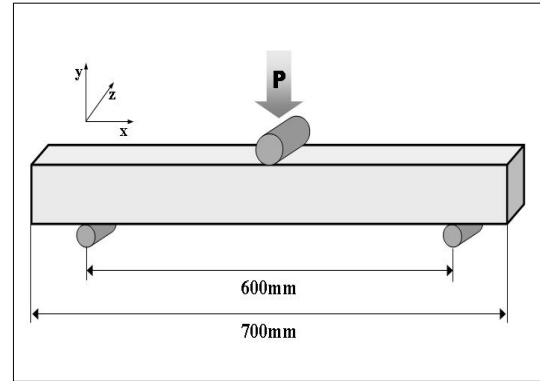


그림 2. 굽힘 시험편의 치수

2.2 시험편의 종류

굽힘 시험에 사용된 시험편은 바이모달 트램에 적용될 예정인 ATOS60 재질의 용접된 사각관 6종류와 비교 대상인 ST52-3 재질의 사각관 2종류이다. 사각관의 단면 형상은 넓이와 높이가 같은 정사각형으로, ATOS60 용접 사각관과 ST52-3 사각관은 각각 80x80 mm와 70x70mm 두 가지 단면 형상을 고려하였다. 이때, ATOS60 용접 사각관은 판재를 ‘ \subset ’자로 절곡한 후 두 모재를 용접하여 관을 제작하였다. 모재의 용접 방법은 아르곤 용접(맞대기 용접)을 사용하였고, 이때 온도는 약 700°C 정도이다. 그림 3은 사각관의 단면 형상과 용접부의 형상을 보여준다.

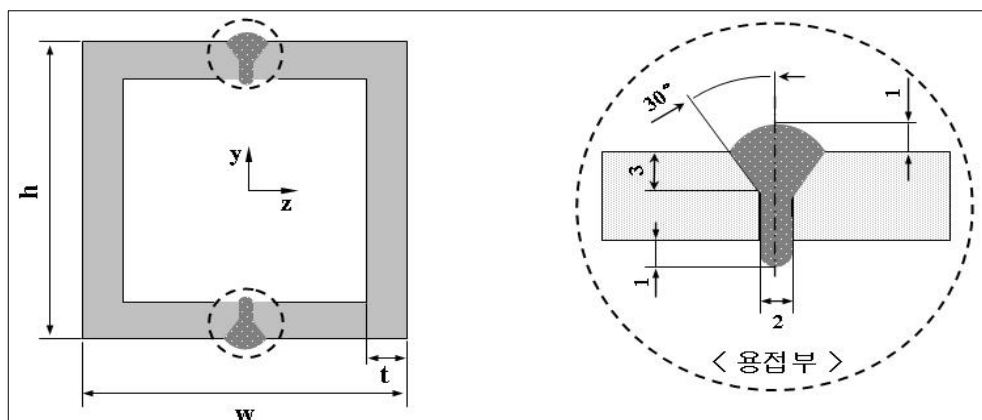


그림 3. 사각관의 단면 형상 및 용접부 형상

ATOS60 용접 사각관은 용접부의 위치에 따라 시험을 각각 수행하였고, 사각관 제작 시 V-굽힘과 R-굽힘 두 가지를 고려하여 굽힘 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 표 1은 시험에 사용된 ATOS60 용접 사각관과 ST52-3 사각관의 시험 종류별 치수를 나타낸 것이다. 또한, 그림 4는 사각관 제작 시 고려된 V-굽힘과 R-굽힘 형상을 보여준다.

표 1. 굽힘 시험에 사용된 사각관의 종류

Case		Dimension (mm)					Group	비 고
		w	h	t	l_t	l_s		
ATOS60	case1	80	80	3.2	700	600	Group A	용접부 윗면 / V-굽힘
	case2	80	80	3.2	700	600	Group A	용접부 측면 / V-굽힘
	case3	80	80	3.2	700	600	Group A	용접부 윗면 / R-굽힘
	case4	80	80	3.2	700	600	Group A	용접부 측면 / R-굽힘
	case5	70	70	4.3	700	600	Group B	용접부 윗면 / R-굽힘
	case6	70	70	4.3	700	600	Group B	용접부 측면 / R-굽힘
ST52-3	case7	80	80	3.8	700	600	Group A	R-굽힘
	case8	70	70	4.3	700	600	Group B	R-굽힘

w: width, h: height, t: thickness, l_t : total length, l_s : span length

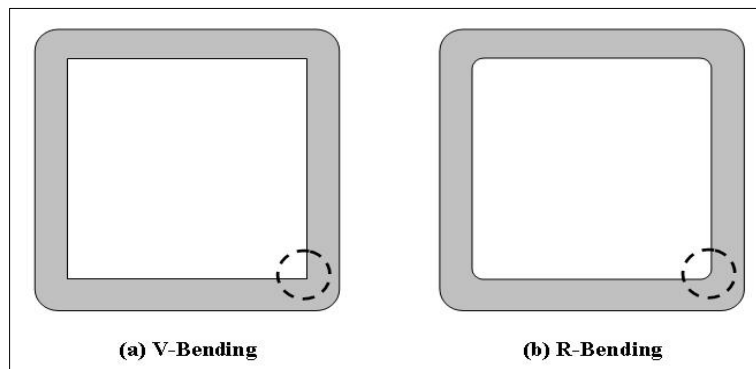


그림 4. V-굽힘과 R-굽힘을 갖는 사각관 형상

2.3 시험 결과

굽힘 시험 결과는 단면의 크기를 고려하여 두 가지 그룹으로 비교하였다. 먼저 80x80 mm 단면을 갖는 그룹 A의 case 1, 2, 3, 4, 7에 대한 굽힘 시험 결과를 통해 ATOS60 용접 사각관의 굽힘 특성을 확인하였다. 이때, 용접부의 위치가 상하로 위치했을 때와 측면부에 위치 한 경우에 대해 결과를 비교하였고, V-굽힘과 R-굽힘에 대해 비교하였다. 또한 ATOS60 용접 사각관과 ST52-3 사각관의 굽힘 특성을 비교하였다. 그림 5는 하중-변위 그래프를 나타낸 것이다.

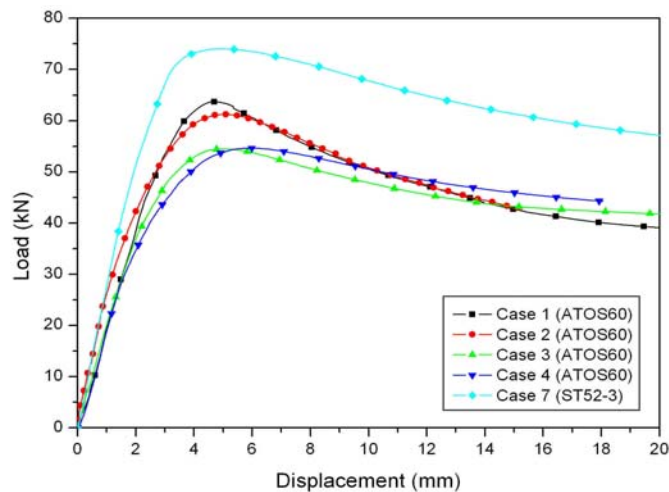


그림 5. 하중-변위 그래프 (Group A)

그룹 A의 시험 결과를 통해 용접부의 위치에 따른 결과의 차이가 크지 않음을 확인 할 수 있었다. 또한, V-굽힘과 R-굽힘을 고려한 시험을 통해 최대 굽힘 하중이 V-굽힘에서 높은 것을 확인 할 수 있었으나, 굽힘 강성에 대해서는 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 이때, V-굽힘이 고려된 사각관에서는 굽힘 시험 후 모서리 부분에서 소성 변형 이후 파손이 확인 되었다. 그리고 ATOS60 용접 사각관과 ST52-3 사각관의 굽힘 시험 결과를 통해 ST52-3 사각관의 최대 굽힘 하중이 V-굽힘 보다는 13~18% 높았고, R-굽힘 보다는 32% 높았다. 굽힘 강성 역시 ST52-3 사각관이 V-굽힘 보다는 22% 높았고, R-굽힘 보다는 20~29% 높았다. 이때, ST52-3의 두께가 0.6 mm 더 두껍게 제작되어 결과에 부분적으로 영향을 준 것으로 판단된다. 그림 6, 7은 최대 굽힘 하중 및 굽힘 강성 결과를 나타낸 것이다.

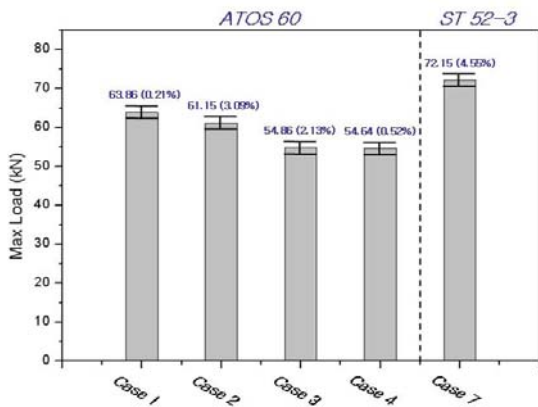


그림 6. 최대 굽힘 하중 결과 (Group A)

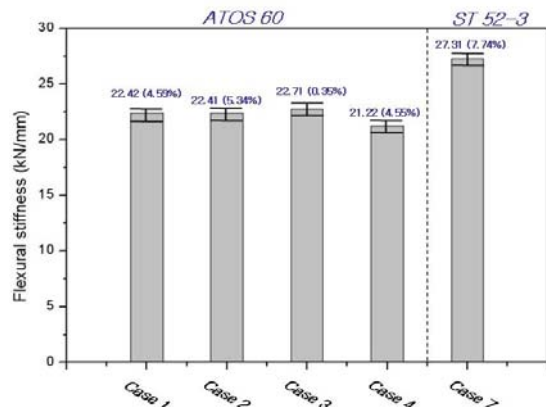


그림 7. 굽힘 강성 결과 (Group A)

다음으로 70x70 mm 단면을 갖는 그룹 B의 case 5, 6, 8에 대한 굽힘 시험 결과를 통해 ATOS60 용접 사각관의 굽힘 특성을 확인하였다. 이때, 그룹 A와 마찬가지로 용접부의 위치가 상하로 위치했을 때와 측면부에 위치 한 경우에 대해 결과를 비교 하였고, ATOS60 용접 사각관과 ST52-3 사각관의 굽힘 특성을 비교하였다. 그림 8은 하중(P)-변위(δ) 그래프를 나타낸 것이다.

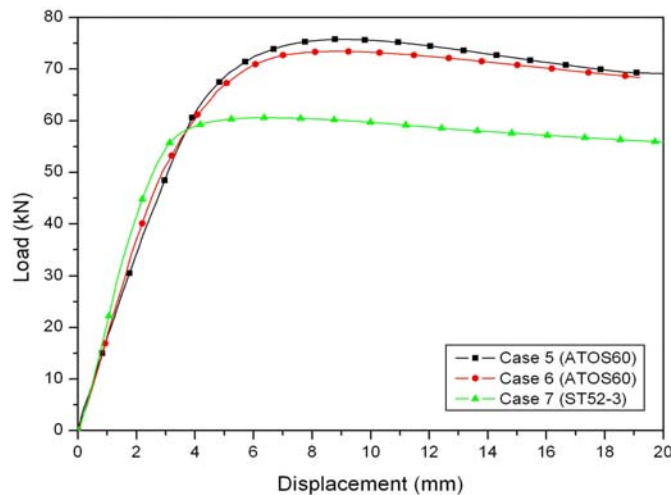


그림 8. 하중-변위 그래프 (Group B)

그룹 B의 시험 결과를 통해 용접부의 위치에 따른 결과의 차이가 크지 않음을 확인 할 수 있었다. 그리고 ATOS60 용접 사각관과 ST52-3 사각관의 굽힘 시험 결과를 통해 ATOS60 용접 사각관의 최대 굽힘 하중이 21~25% 높았으나, 굽힘 강성은 ST52-3 사각관이 18~29% 높았다. 이때, 그룹 A의 결과와 달리 최대 굽힘 하중이 ATOS60 용접 사각관이 높게 확인 되었으며, 이는 단면 두께가 그룹 A에 비해 증가

되어 국부적인 좌굴 현상이 감소하여 하중이 높게 나타난 것으로 판단된다. 그림 9, 10은 최대 굽힘 하중(Max. load) 및 굽힘 강성(Flexural stiffness) 결과를 나타낸 것이다. 그림 11은 각 시험별 사각관의 변형된 형상을 보여준다.

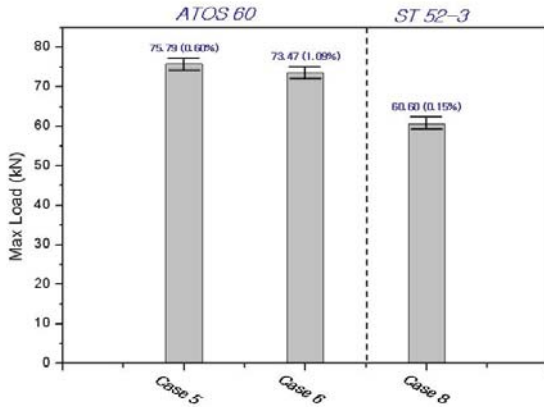


그림 9. 최대 굽힘 하중 결과 (Group B)

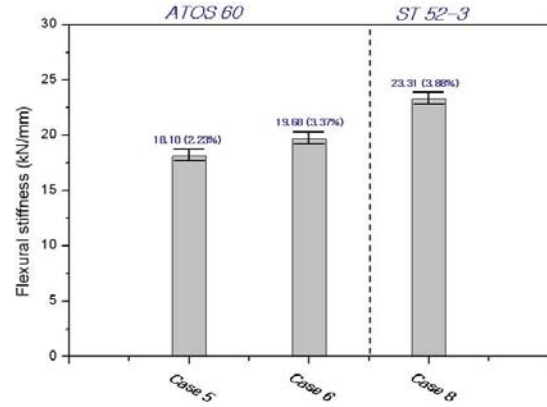


그림 10. 굽힘 강성 결과 (Group B)

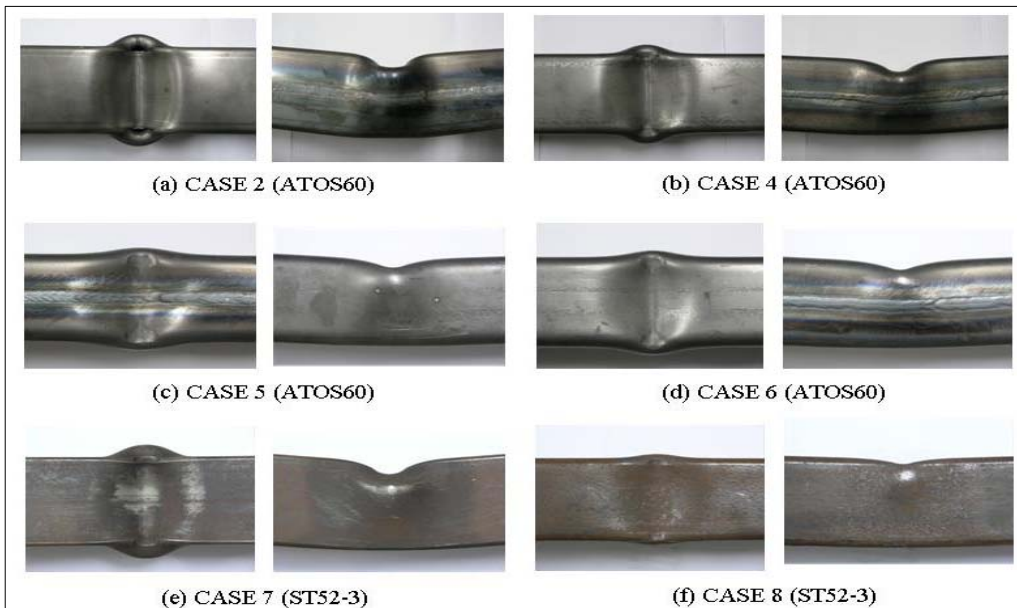


그림 11. 굽힘 하중에 의한 사각관의 변형 모습

3. 비선형 굽힘 해석

굽힘 시험에 대한 해석적 검증을 위해 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 시험적 결과와 해석적 결과를 비교하였다. 유한요소 해석을 통해 얻은 결과는 추후 용접된 사각관이 적용된 구조물이 적용된 구조물에 대해 구조적 안전성 평가 시 사용될 수 있다. 해석에 사용된 유한요소 프로그램은 ANSYS v11.0이다.

3.1 유한요소 모델링 및 조건

용접된 사각관 굽힘 해석에 사용된 유한요소 모델은 쉘 181 요소를 사용하여 사각관 단면의 중립축을 모델링하였고, 두께 값을 적용하였다. 또한, 굽힘 시험에 사용된 하중 봉은 솔리드 45 요소로 모델링하여 해석에 적용하였다. 이때, ATOS60 물성은 표 2와 같으며 해석 간에는 제작사에서 제공한 응력-변형률 선도를 적용하였다. 사각관의 길이 방향에 대한 중심 절점들의 x축 변위를 구속시켜주었으며, 지지대가 위치하는 절점들은 y축, z축 변위와 x축, y축 회전을 구속시켜 주었다. 그림 11은 해석에 적용된 유한요소 모델을 보여주며, 그림 12는 구속조건을 보여준다.

표 2. ATOS60의 물성 데이터

ATOS60	Elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
	185	544	640

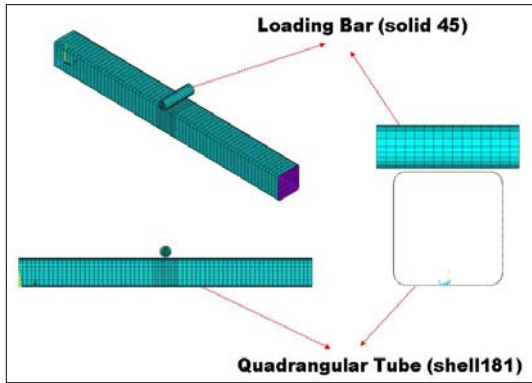


그림 12. 사각관의 유한요소 모델링

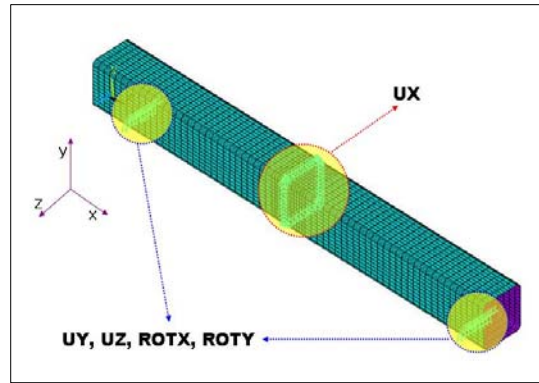


그림 13. 구속 조건

3.2 굽힘 해석 결과

ATOS60 용접 사각관의 굽힘 해석은 용접부를 고려한 모델과 V-굽힘과 R-굽힘 소성 변형에 의한 잔류 응력(prestress)이 고려된 모델에 대해 각각 비선형 해석을 수행하여 결과를 확인하였다. 이때, 용접부의 물성과 V-굽힘, R-굽힘된 부분에 대한 정확한 물성을 얻을 수 없기에 각 부분에 대한 물성을 ATOS60을 기준으로 50% 저하 시킨 후 시험 결과와 비교하였다.

굽힘 시험과 해석을 통해 얻은 ATOS60 용접 사각관의 하중-변위 그래프를 통해 최대 굽힘 하중은 비슷한 결과를 보였으나, 강성은 시험 결과가 선형 범 이론식 결과와 해석 결과에 비해 작은 것을 확인하였다. 이때, 하중-변위 결과에 영향을 미칠 것으로 판단되는 용접부의 물성을 50% 저하 시킨 후 해석을 수행하였으나, 강성 값의 변화는 미비하였다. 반면, V-굽힘, R-굽힘 소성 가공에 의한 영향을 고려하여 물성을 50% 저하 시킨 후 해석한 결과는 강성 값이 시험에 가까워짐을 확인하였다. 따라서 굽힘 강성은 용접부에 의한 영향보다 사각관 제작 시 굽힘 소성가공에 의한 잔류응력의 영향을 크게 받는 것으로 확인하였다. 그림 13은 case 4, 6의 시험과 선형 범 이론식, 해석을 통해 얻은 하중-변위 그래프를 나타낸 것이며, 그림 14는 해석에 의한 변형 결과로서 굽힘 하중에 의한 국부적인 좌굴 현상을 확인할 수 있다.

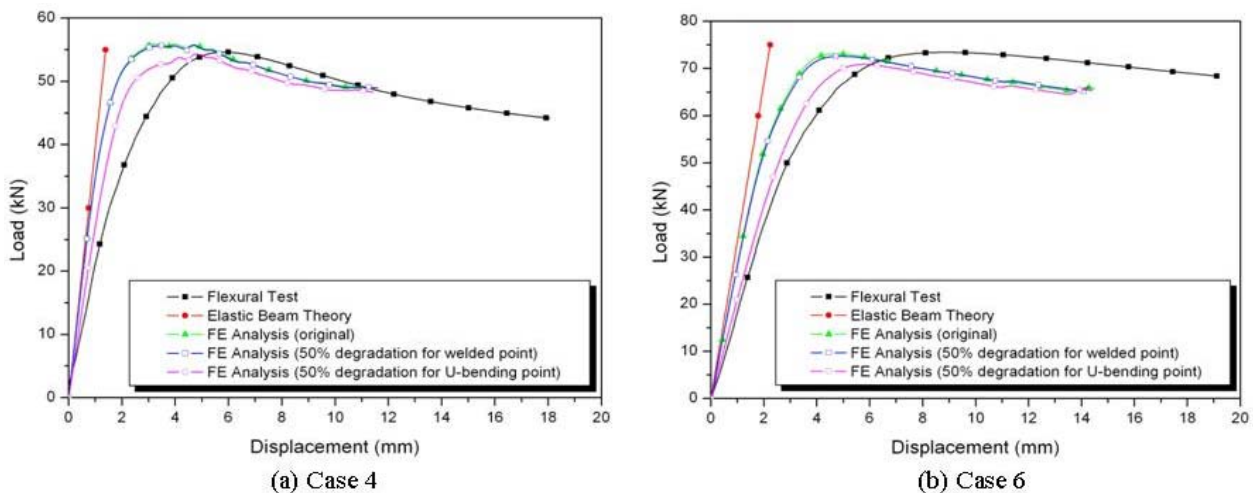


그림 14. 시험 및 해석 그래프 비교

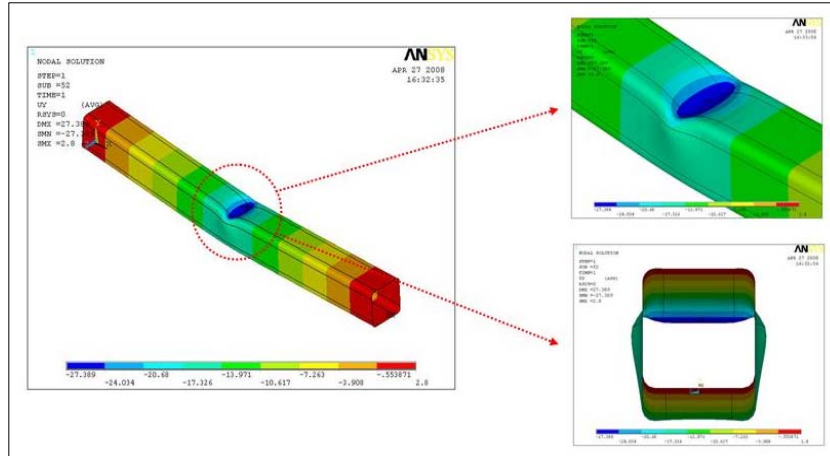


그림 15. 굽힘 해석 결과

4. 결 론

본 연구는 바이모달 트랩에 적용될 예정인 ATOS60 용접 사각관에 대한 굽힘 특성을 평가하기 위해 6 가지 종류의 사각관과 비교 시편인 ST52-3 사각관 2가지에 대해 시험을 수행하였고, 비선형 유한요소 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 사각관 제작 시 V-굽힘이 적용된 사각관이 R-굽힘이 적용된 사각관보다 최대 굽힘 하중이 높은 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 R-굽힘이 적용된 사각관에서는 소성 변형만 일어났으나, V-굽힘이 적용된 사각관에서는 굽힘 시험 후 모서리 부분에서 파손이 확인되었다.

(2) 굽힘 시험 결과를 통해 ATOS60 용접 사각관은 같은 단면 크기를 갖는 ST52-3에 비해 강성 값은 작았고, 굽힘 강도는 높은 값을 갖는 것을 확인하였다. 이때, 강성 값이 ATOS60 용접 사각관이 ST52-3에 비해 작게 측정되었으나, 구동축 프레임에 적용 시 구조적으로는 안전한 것으로 판단된다.

(3) 비선형 유한요소 해석을 통하여 용접부위의 물성 변화와 위치는 굽힘 강성에 미비한 반면, 사각관 제작 시 굽힘 소성 가공은 굽힘 강성에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 따라서 사각관 제작과정의 굽힘 소성 가공 시 잔류응력을 최소화하기 위해 방법과 제작 공정의 개선이 필요한 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 (주)우진산전의 “시험과 수치적 기법을 통한 용접된 사각 각형관의 구조 특성 평가” 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. D. Keman(1979), “Bending Collapse of Rectangular Section Tubes in Relation to the Bus Roll-Over Problems”, PH.D Thesis, Cranfield Institute of Technology, U.K.
2. T. J. Lardner, R. R. Archer(1994), “Mechanics of Solids”, McGraw-Hill.
3. S. Y. Kang, I. B. Chang, H. Y. Kim(1998), “Development of a Pure Bending Test Machine and Bending Collapse Characteristics of Rectangular Tubes”, Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 222-233
4. S. H. Lee, N. S. Choi(2005), “Bending Performance Evaluation of Reinforced Aluminum Square Tube Beams”, Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 13, No. 5, pp. 171-180