

## 용접구조물의 부분 제거에 따른 용접변형의 재분포에 관한 실험적 연구

김용래\* · 왕 초\* · 김재웅\*\*†

\* 영남대학교 기계공학부

### Experimental Study of the Redistribution of Welding Distortion According to the Partial Removal of Welded Structure

Yong Rae Kim\*, Chao Wang\*\* and Jae Woong Kim\*\*\*†

\* School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.

(Received March 17, 2015 ; Revised April 18, 2015 ; Accepted May 7, 2015)

**Key Words:** Fillet Welding(필릿용접), Lug Cutting(러그절단), Welding Distortion(용접변형), Redistribution(변형재분포)

**초록:** 용접변형은 용접 시 구조물 내에서의 불균일한 온도분포특성으로 인하여 필연적으로 유발되는 현상이다. 또한 용접변형이 발생된 용접구조물의 일부를 제거하는 과정에서 구조물내의 용접잔류응력과 강성의 연속적인 변화에 따라 추가적인 변형이 발생하여 변형의 재분포가 이루어진다. 특히, 이러한 현상은 선박의 제조과정 중 대형블럭을 옮기기 위해 설치된 러그의 절단과정에서 살펴볼 수 있다. 용접구조물의 부분 제거 시 발생하는 변형의 재분포는 절단공구의 파손 등의 문제를 야기하기도 한다. 본 논문은 실험을 통하여 용접구조물의 부분 제거에 따른 용접변형의 재분포가 어떠한 양상으로 발생하는지 연구하기 위한 것이다. 실험을 위해 필릿용접을 실시하였고, 용접된 리브의 일부를 제거함에 따라 발생하는 중첩힘과 각변형을 측정하여 비교 및 분석하였다.

**Abstract:** During the welding process, welding distortion is caused by the non-uniformity of the temperature distribution in the weldment. Welding distortion is redistributed because the residual stress and rigidity change according to the removal of the welded structure. In shipbuilding in particular, this phenomenon may be observed during the cutting process of lugs that are attached to blocks for transfer. The redistribution of welding distortion also causes problems, such as damage to the cutting tool. The aim of this study is to experimentally analyze the redistribution of welding distortion because of the partial removal of the welded structure. In the experiments conducted in this study, fillet welding and cutting were performed, and longitudinal bending and angular distortion in the welded structures were then investigated and analyzed.

### 1. 서론

용융용접은 국부적으로 재료를 용융시켜 결합하는 방법으로 부재를 구조적으로 일체화시키는 작업이다. 용접과정 중 용접구조물은 용접열원에 의해 가열과 냉각의 열이력을 가지게 되며, 열전달에 의해 불균일한 온도분포가 연속적으로 발생된다. 이러한 불균일한 온도분포에 의해 열팽창이

국부적으로 분포되어 발생하며, 동시에 재료의 기계적 성질도 크게 변화되며, 내외적 구속에 의해 용접구조물에서는 용접변형이 발생하게 된다.<sup>(1-3)</sup> 이러한 용접변형은 영구적인(소성) 변형과 함께 탄성변형을 포함하게 되는데, 탄성변형량은 용접잔류응력분포와 평형상태를 이루게 되는 정도로 발생하게 된다.

한편, 용접변형이 발생된 용접구조물의 일부를 제거하게 되면 구조물의 강성과 내외적 구속조건이 변화하게 되고, 이에 따라 용접잔류응력의 재분포가 이루어진다. 절단과정에서 용접잔류응력이

† Corresponding Author, [jaekim@ynu.ac.kr](mailto:jaekim@ynu.ac.kr)

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

새로운 평형상태에 도달함에 따라 추가적인 변형이 발생하게 되며, 이는 변형의 재분포로 나타나게 된다.<sup>(3-5)</sup>

이러한 용접변형의 재분포 현상은 선박의 제조 과정에서 찾아 볼 수가 있다. 선각공장에서 제작된 대형블록을 크레인을 이용하여 도크로 이동시키기 위해 블록에 다수의 러그(lug)를 용접을 통해 설치하고, 블록의 이동이 완료되면 러그를 제거하게 된다. 이러한 과정에서 앞서 언급한 바와 같이 용접변형의 재분포가 발생하게 되는 것이다. 러그를 제거하는 방식은 크게 산소절단법, 와이어 커팅 및 티톱 커팅 등이 사용된다. 특히 띠톱을 이용하는 경우, 러그를 제거하는 과정에서 용접변형의 재분포에 의해서 띠톱이 절단 틈새에 끼어 더 이상 절단이 진행되지 않거나, 절단공구가 파손되는 사례가 발생된다. 이러한 문제점을 파악하기 위하여 용접변형의 재분포현상을 분석할 필요가 있다.

본 논문의 목적은 용접구조물의 부분 제거에 의해 재분포되는 용접변형의 유형을 실험을 통해 분석하고자 함에 있다. 즉, 재분포되는 용접변형을 최소화하거나 적절한 절단위치를 선정하기 위한 기초자료를 마련하고자 한다. 다양한 용접변형 중에서 각변형과 종굽힘에 대하여 분석하였으며, 이를 위해 필릿용접 실험과 러그의 절단 실험을 실시하였다.

**Table 1** The measurements of fillet weldment

Length of plate	300 mm
Width of plate	200 mm
Thickness of plate	9.8 mm
Length of rib	100 mm
Height of rib	10, 40 mm
Thickness of rib	8 mm



**Fig. 1** Fillet weldment(rib height 40mm)

## 2. 실험

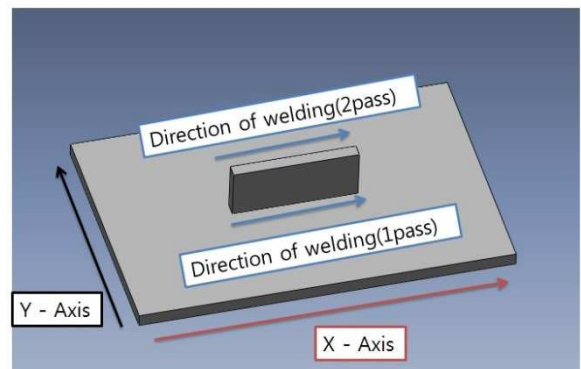
### 2.1 용접 실험

용접변형의 양상과 변형량을 측정하기 위하여 우선적으로 필릿 용접을 실시하였다. 용접방법은 일반구조용강재의 용접에 널리 적용되고 있는 GMAW(gas metal arc welding)를 적용하였으며, 용접구조물의 형상 및 치수는 Fig. 1 및 Table 1에 나타낸 바와 같다. 여기서 러그(lug)를 대신하여 직사각판재 형상의 리브(rib)를 용접하여 부착하였다.

한편, 용접 실험에 적용된 시편은 SCM440 이며, 용접 전류, 용접전압 및 용접속도는 각각 345A, 35V, 7.8mm/s 이다. Fig. 2에 실험에 적용된 필릿용접의 공정을 나타내었다.

### 2.2 리브 절단 실험

필릿용접구조물에 대하여 리브 절단 실험을 실



**Fig. 2** The welding sequence of fillet welding



(a) 30mm cutting by wire cutting machine(10mm of rib remained)



(b) All cutting by milling machine

**Fig. 3** Fillet weldment after cutting off the rib

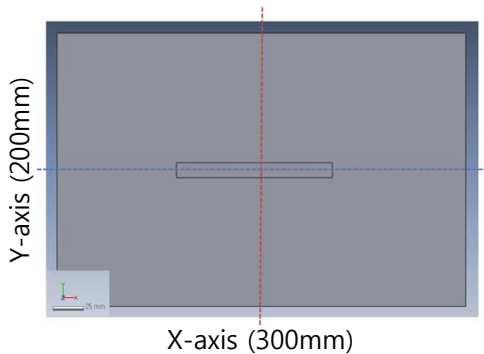


Fig. 4 Measurement directions of welding deformation

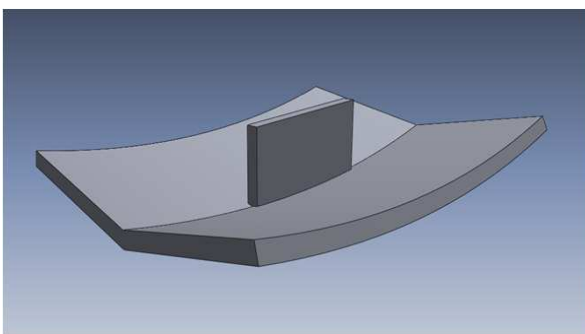


Fig. 5 Typical deformation shape of fillet weldment

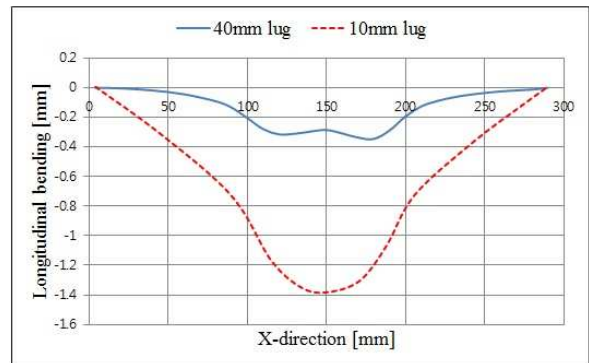
시하였다. 리브 높이가 40mm 인 용접구조물을 대상으로 와이어 커팅(WEDM; wire electric discharge machining)으로 리브의 하부를 10mm 만 남기고 절단한 후, 밀링가공으로 잔여 리브를 완전히 제거하였다. Fig. 3 은 리브를 절단 및 제거한 후의 용접구조물 형상을 나타낸 것이다.

### 2.3 용접변형의 측정

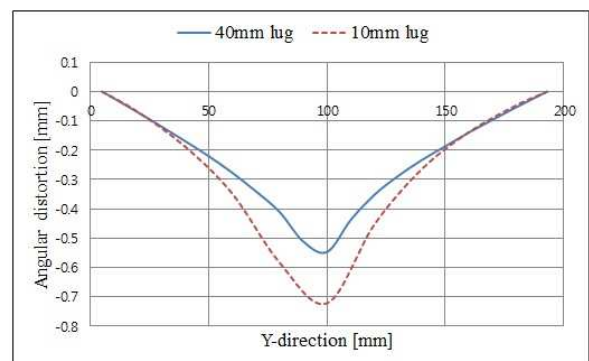
용접구조물의 제작 후와 리브의 부분절단 후 각각 용접변형량을 측정하였으며, 이 때 정확한 측정을 위해 3 차원 정밀측정기(3 dim-coordinate measuring machine)를 이용하였다. 변형량의 측정은 평판 하부면(바닥면)을 대상으로 실시하였는데, 이는 상부면에서는 리브에 의해 위치간섭이 발생하기 때문에 정확한 값을 측정하기 어렵기 때문이다.

다양한 용접변형 중, 필릿 형상의 용접구조물에서 주로 발생하는 각변형(angular distortion)과 종굽힘(longitudinal bending) 변형을 살펴보기 위해 시편의 중심부를 기준으로 X, Y 축 방향에 대하여 변형량을 측정하였다. Fig. 4 에 각변형 및 종굽힘의 측정방향을 도시하였다. 여기서 X 축 방향으로 측정한(그림의 수평선 방향; 길이 300mm) 변화성분을 종굽힘 변형이라 하며, Y 축 방향으로 측정한(그림의 수직선 방향; 길이 200mm) 변화성분을 각변형이라 한다.

Fig. 5 에는 필릿용접 시 발생하는 종굽힘과 각



(a) Longitudinal bending



(b) Angular distortion

Fig. 6 The measured welding distortions after welding

각변형의 양상을 나타내었다. Fig. 5 와 같이 필릿 용접을 실시하면 리브에 의한 구속조건에 의해 평판 면에서 X 방향으로 종굽힘, Y 방향으로 각변형이 발생하게 된다.

용접변형량의 측정은 리브 높이가 각각 40mm, 10mm 인 용접구조물 두 가지와 40mm 높이의 리브를 30mm 제거한 경우 및 전체 제거한 경우 두 가지로 하여 총 네 가지의 시편을 대상으로 실시하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 용접 후 용접변형 측정결과

Fig. 6 에 10mm, 40mm 높이의 리브를 용접했을 때 발생된 종굽힘과 각변형량을 나타내었다. 측정된 변형량을 통해 Fig. 5 에 나타낸 바와 같은 양상의 종굽힘과 각변형이 발생되었음을 확인할 수 있다. 이는 용접 시 고온으로 가열된 용접비드 및 비드 근접부위가 서서히 식어감에 따라 수축하게 되므로, Fig. 5 와 같이 용접선이 지나간 곳을 중심으로 아래로 오목하게 들어가는 형상으로 용접변형이 발생하게 되는 것이다. 이 때 오목하게 변형되는 과정에서 변형의 진행을 방해하는 성분으로 내적/외적 구속이 작용하게 된다. 내적 구속은 리브 및 평판의 강성 또는 단면모멘트를 들 수 있으

있으며, 이는 변형에 저항하는 역할을 하게 된다. 외적 구속은 클램프 등에 의해 평판을 고정하는

경우를 들 수 있으며, 이 경우도 변형에 저항하는 역할을 한다. 따라서 이러한 내외적 구속에 의해 변형량은 달라지게 되며, 대표적으로 리브의 높이에 따른 내적 구속의 변화에 의해서도 변형량은 달라지는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 6 을 통해 최대 종굽힘은 리브 높이 40mm 에서 약 0.35mm, 리브 높이 10mm 에서 약 1.4mm 로 나타남을 확인할 수 있으며, 최대 각변형은 리브 높이 40mm 에서 약 0.55mm, 리브 높이 10mm 에서 약 0.72mm 로 나타남을 확인할 수 있다. 결과를 통해 리브 높이가 10mm 일 때 종굽힘과 각 변형값이 더 크게 나타남을 확인할 수 있는데, 이는 선행된 연구에서 분석된 결과와 같다.<sup>(5)</sup>

3.2 리브 절단 후 변형 측정결과

Fig. 7 에 리브를 절단하기 이전의 변형과 절단한 후의 변형을 비교하였다. Fig. 7 의 (a)에서 리브를 30mm 절단했을 때 종굽힘 변형량이 약 0.73mm 로 크게 나타났으며, 이 후 잔여 리브를 모두 절단했을 때는 종굽힘량이 오히려 감소했음을 볼 수 있다. 여기서 절단위치에 따라서 재분포된 변형량이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 특히 리브를 30mm 절단했을 때 종굽힘 변형량이 크게 증가한 것을 볼 수 있는데, 이는 평판이 더욱 오목하게 변형된 것으로서 절단할 때 띠톱의 끼임 현상이 발생하는 것과 관련되어 있음을 추정할 수 있다. 한편, Fig. 7 의 (b)에 나타난 각변형량 역시 리브를 절단함으로써 미세하게 증가함을 확인할 수 있는데, 종굽힘과 비교해서 그 영향은 적음을 알 수 있다.

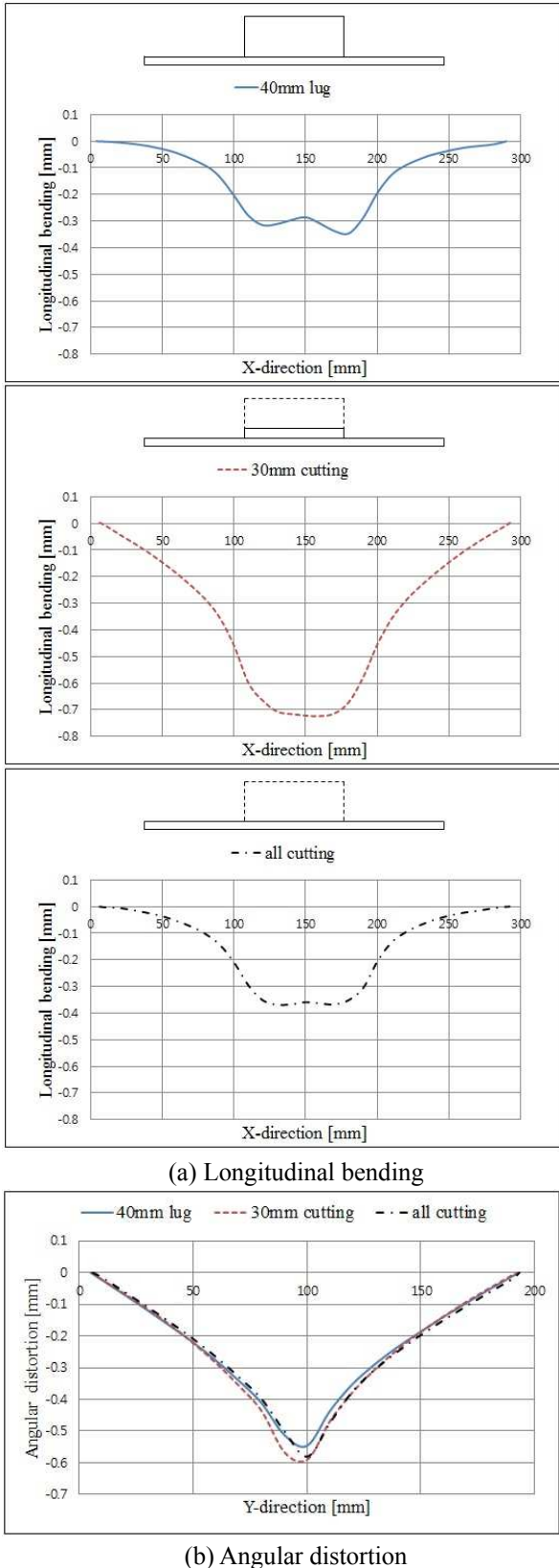


Fig. 7 Comparison of distortion after welding and cutting

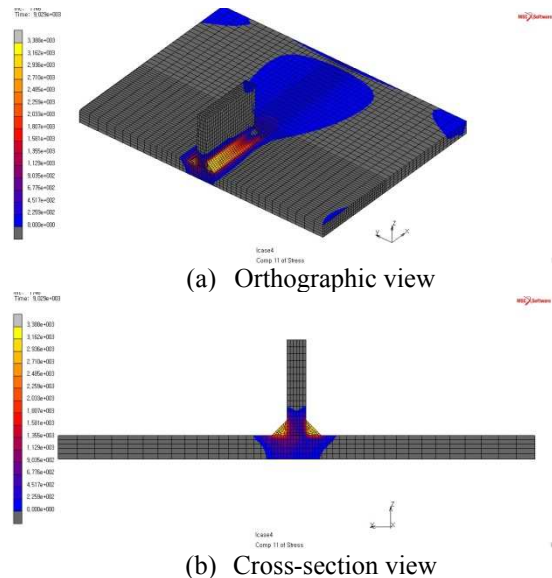


Fig. 8 Typical distribution of welding residual stress in fillet weldment

Fig. 8 의 (a)와 (b)는 필릿용접부의 길이방향(x-방향) 용접잔류응력의 분포를 나타낸 것으로, 밝은 색 부위가 인장응력, 어두운 부분이 압축응력을 나타낸다. 용접비드와 비드 근접부위는 매우 큰 인장응력이 분포되어 있다. 이것은 매우 높은 온도로 가열되었던 부위가 서서히 냉각됨에 따라 수축이 일어나면서 발생하는 인장응력으로써 종굽힘 변형의 주요 원인이 된다. 반면 리브의 상부는 용접부의 인장응력에 대응해서 평형을 이루기 위한 압축응력이 형성 분포된다. 따라서 리브의 상부를 30mm 절단했을 때 압축응력을 지지하던 부위가 사라지면서 용접비드 부위의 인장응력에 의해 종굽힘 변형은 추가로 발생하게 되어 큰 값을 나타낸다. 반면, 인장응력이 걸려있는 용접비드 부위를 대부분 포함하고 있는 리브를 모두 제거하면, 종굽힘 변형을 추가로 유발하는 요인이 제거됨으로 인해 30mm 절단했을 때 보다 오히려 종굽힘 변형이 감소하며, 절단을 하지 않은 초기의 변형량과 비교해서는 약간의 추가적인 변형이 일어난 것을 볼 수 있다.

이러한 분석을 통해서 리브의 절단위치가 종굽힘 변형의 추가적인 발생에 영향을 미친다는 것을

알 수 있고, 절단시 공구의 끼임현상을 최소화하기 위해서는 절단위치를 평판의 상면에 근접시키는 것이 유리한 것으로 판단된다.

### 3.3 10mm 리브와 부분절단 리브 구조물의 변형비교

Fig. 9 에는 10mm 높이의 리브를 용접한 것과 40mm 높이의 리브를 용접한 후 30mm 절단한 구조물에 대해 종굽힘을 비교한 것이다. 비교결과 10mm 높이의 리브를 용접한 상태 그대로의 종굽힘 변형량이 리브를 절단한 것의 종굽힘 변형량보다 크게 나타남을 볼 수 있다. 최종 리브의 높이는 동일하지만 변형량의 차이가 나타나는 것은 용접이 실시될 때의 조건, 특히 리브의 높이라는 내적 구속조건이 다르기 때문이다. 이를 통해 최종 변형량을 줄이기 위한 방안으로 리브를 용접한 후 절단하는 방법을 취할 수 있으며, 절단하기 전의 종굽힘 변형량을 줄이기 위해서는 충분한 내적 구속을 부여하기 위해 리브의 높이를 일정한 높이 이상으로 해야 함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 필릿용접 실험 및 리브 절단 실험을 통하여, 용접변형의 재분포가 어떠한 양상으로 발생되는지 살펴보았다. 또한 리브의 절단에 따른 종굽힘 변형의 추가적인 발생요인에 대하여 검토하였다. 각각의 실험 후 시편의 종굽힘과 각 변형량을 측정 및 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 필릿용접 실험결과를 통해 리브의 높이가 낮을수록 종굽힘 및 각변형량이 커짐을 확인할 수 있었다.
- (2) 리브 절단 실험을 통해 용접구조물의 일부를 제거함으로써 인해 용접변형의 재분포가 발생하며, 변형량이 증가함을 알 수 있었다. 특히 종굽힘 변형에서 재분포 발생이 크게 나타났다
- (3) 리브 절단에 의한 용접변형의 재분포에 있어서, 리브의 절단 위치가 종굽힘 변형량의 추가 발생에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 용접비드를 포함하여 잔여 리브를 모두 절단하는 경우, 종굽힘 변형의 추가발생 요인이 제거되는 것으로 인해 종굽힘 변형량이 감소함을 알 수 있었다.

### 참고문헌 (References)

- (1) Dong, P., 2005, "Residual Stress and Distortions in Welded Structures," *Journal of Science and*

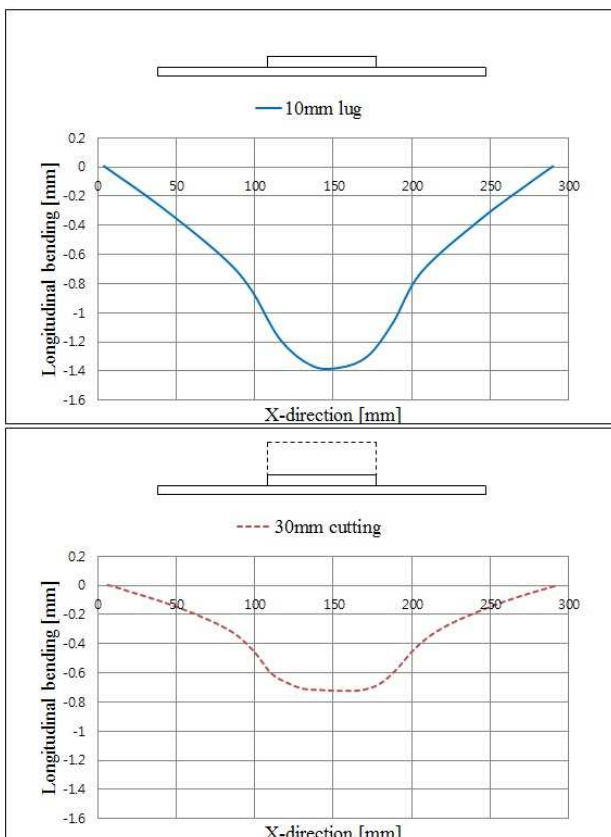


Fig. 9 Comparison of longitudinal bending after welding (10mm rib) and cutting

- Technology of Welding and Joining*, 10-4, pp. 389~398.
- (2) Yang, Y.-S., 2005, "Generation Mechanism and Analysis of Welding Distortion," *Journal of KWJS*, 23-4, pp. 317~321.
- (3) Jang, G.-B. and Kang, S.-S., 2000, "Numerical Modeling of the Transformation Temperature Effect on the Relaxation of Welding Residual Stress," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 24, No. 10, pp. 2552~2559.
- (4) Li, B., Jiang, X., Yang, J. and S. Liang, Y., 2015, "Effects of Depth of Cut on the Redistribution of Residual Stress and Distortion During the Milling of Thin-Walled Part," *Journal of Materials Processing Technology*, 216, pp. 223~233.
- (5) Yang, Z. and Lee, Y., 2014, "The Study for Redistribution Residual Stress for Cutting of Welded Specimens," *Proceedings of the KSME Reliability Engineering Division 2014 Spring Conference*, p. 124.
- (6) Uezaki, K., Shimizu, J. and Zhou, L., 2014, "Development of Metal Cutting Process Accompanied by a Localized Compressive Hydrostatic Stress Field Formation: Examination by Molecular Dynamics Simulation," *Precision Engineering*, 38, pp. 371~378.
- (7) Kim, Y.-R., Song, G.-Y., Wang, C. and Kim, J.-W., 2013, "A Study on the Welding Distortion Analysis According to Rib Height in Fillet Welding," *Journal of KWJS*, 31-6, pp. 107~111.