고주파 유도가열을 이용한 열간 파이프 벤딩 공정에 관한 연구

A Study on the Hot Pipe Bending Process using High Frequency Local Induction Heating

이동주* · 김동진** · 김병민**
* 현대중공업 산업기술연구소
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

1. 서 론

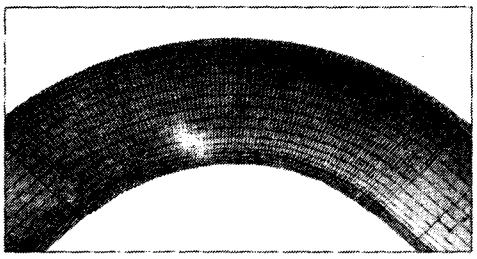
고주파 유도가열을 이용한 열간 파이프 벤딩 공정은 금형 제작 또는 용접 작업 없이 작은 벤딩 곡률을 가지는 벤드 및 대형 관의 벤드 제작에 널리 사용되는 공법으로 현재 조선, 발전설비, 플랜트 등의 산업분야에서 널리 적용되고 있는 공법이다.[1] 그러나 고주파 유도가열을 이용한 파이프 벤딩 공정 중에 벤딩 외측은 인장응력으로 인해 두께가 감소하고 내측은 압축응력에 의해 두께가 증가하는 경향을 가진다. 파이프 벤드제품이 주로 높은 온도와 압력을 가지는 유체의 수송에 사용됨을 감안하여 공학적 설계요건은 최대 두께 감소율을 12.5% 이내로 제한하고있다.[2] 파이프의 두께 감소율을 최소로 하고 벤딩 곡률을 작게 하기 위해서는 기존의 열간 벤딩 공정으로는 불가능하기 때문에 반력모멘트를 성형 중에 작용시켜 인장응력이 작용하는 영역을 상대적으로 줄이거나 고주파 유도가열 공정에서 파이프의 온도구배를 부여하여 인장응력이 작용하는 벤딩 외측의 유동응력을 증가시켜야 한다. 따라서 본 연구에서는 먼저 설계조건을 만족하는 최적의 파이프 벤딩 공정설계를 위해 벤딩 및 유도가열공정에 대한 수치해석을 수행하였으며 해석의 타당성 검증을 위해 동일한 조건하에서 파이프 벤딩 실험을 수행하였다.

2. 벤딩 공정 해석 및 설계

고주파 유도가열 공정은 크게 벤딩공정과 고주파 유도가열에 의한 국부 가열공정으로 나누어진다. 먼저 파이프 제원 및 공정변수에 따라 설계조건을 만족하기 위해 부가해야할 반력모멘트는 파이프 재질은 강완전 소성체이고, 파이프 단면의 형상변화는 없다는 가정하에서 벤딩 메카니즘을 이론적으로 규명하여 계산하였다.

2.1 유한요소 해석 및 결과

유도가열 온도분포 및 이송속도, 파이프의 제원, 벤딩 곡률 등의 공정 변수에 따른 두께 감소의 영향을 평가하기 위한 유한 요소 해석을 수행하였다. 해석은 벤딩각도 90° 만큼 수행하여 벤딩각도에 따라 반력모멘트와 온도구배가 두께 감소율에 미치는 영향을 평가하였으며 설계조건을 만족하기 위해 필요한 반력모멘트 량과 온도구배 량을 계산하였다. 고주파유도 가열장치에 의한 국부 가열효과는 온도 경계조건으로 처리하였다. 즉, 시간에 따른 가열 온도를 요소 절점에 입력함으로서 파이프의 이송속도에 대한 파이프의 온도변화를 모델링하였다. 또한 온도구배를 부여하기 위한 경계조건은 파이프 단면을 90° 단위의 네 영역으로 나누고 각 영역마다 온도분포를 달리하도록 하여 부여하였다. 온도구배는 벤딩의 외측과 벤딩 내측의 온도차이로 정의하였다. 검증을 위해 실제 현장에서 생산에 적용되는 파이프 제원을 사용하여 해석을 수행하였다.



(a) Deformation by FE analysis result

(b) Photograph of pipe bending product

Fig. 1 Comparison of deformed shape between FE analysis and experiment

Fig. 1은 90° 유한요소 해석과 실험에 의한 파이프의 변형양상을 나타낸다. 해석결과 반력모멘트를 부가함에 따라 중립축의 위치가 파이프 외측으로 이동함을 알 수 있었으며 반력모멘트 부가량이 증가함에 따라 중립축의 파이프 외측으로 이동량 또한 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 2는 반력모멘트와 온도구배에 따른 해석결과를 나타낸다. 반력모멘트와 온도구배가 증가함에 따라 파이프의 최대 두께 감소율이 감소함을 알 수 있다. 특히 반력모멘트 량이 28898 $Kg_f \cdot m$에서의 평균 최대 두께감소율이 12.02 %로 설계조건을 만족함을 알 수 있었으며 온도구배의 경우 250℃에서 평균 최대두께감소율이 11.8%로 반력모멘트 없이 설계조건을 만족하는 값을 가짐을 알 수 있었다.

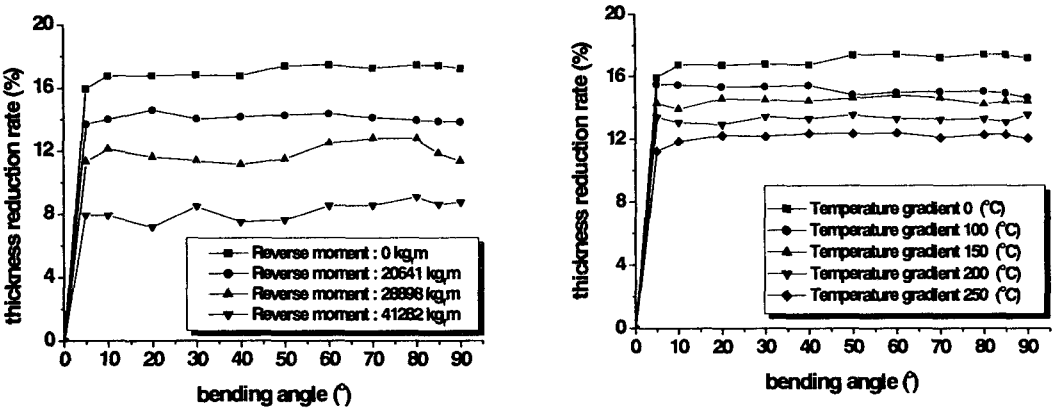


Fig. 2 The reduction of wall thickness versus the variation of the reverse moment and temperature gradient

2.2 고주파 유도가열 공정 해석 및 결과

고주파유도가열 공정에서 온도에 가장 많은 영향을 미치는 공정변수는 가열 주파수, 파이프 이송속도와 냉각율이다. 가열 주파수의 경우 침투깊이를 결정함으로써 파이프 두께 방향으로의 온도 분포에 큰 영향을 미치며 파이프 이송속도는 파이프의 가열시간을 결정한다. 그리고 벤딩 후 냉각수에 의한 냉각 또한 파이프의 온도분포에 큰 영향을 미친다.

먼저 파이프 이송과 냉각이 없다는 가정하에서 가열 주파수만 변화시켜 가열 특성을 평가하였다. 해석 결과 최대 온도는 가열코일의 중앙에 가장 근접한 절점에서 나타났으며 파이프 내부로 갈수록 온도는 감소함을 알 수가 있었다. 또한 주파수가 높아짐에 따라 침투깊이가 감소하기 때문에 두께 방향으로 불균일 한 온도분포가 증가함을 알 수 있었다. 그러나 주파수가 낮은 경우에는 침투깊이는 깊지만 상대적으로 파이프에 발생하는 전류밀도가 낮아져 비교적 낮은 온도분포가 나타남을 알 수 있었다.

가열주파수는 일정하게 하고 냉각은 없다는 가정하에서 파이프의 이송속도를 변화시켜 이송속도에 따른 가열 특성을 평가하였다. 해석결과 이송 속도가 증가함에 따라 가열온도가 감소할 뿐만 아니라 파이프두께방향으로 불균일 온도분포가 증가됨을 알 수 있었다. 다음으로 가열주파수, 파이프 이송속도는 일정하게 하고 벤딩 후 냉각영역에서의 냉각수와 파이프와의 대류 열전달계수만을 변화시켜 냉각특성에 따른 온도분포를 해석하였다. 해석에 사용된 냉각수의 대류 열전달계수는 일반적인 물의 강제대류의 대류계수 범위에서 선정하였다. 해석결과 냉각수의 대류열전달 계수가 증가할수록 높은 냉각율로 인해 전반적으로 파이프의 온도분포는 낮아지는 반면 파이프두께 방향의 온도 편차량은 감소함을 알 수 있었다. 해석결과로부터 냉각조건의 변화로 온도구배 부여가 가능함을 알 수 있었다.

2.3 벤딩 실험

유한요소 해석으로부터 평가된 반력모멘트 및 온도구배 효과를 검증하기 위해 파이프 벤딩 실험을 수행하였다. 반력모멘트 부가량은 이론 해석과 유한요소 해석에서 설계조건을 만족하는 값인

28898 $Kg_f \cdot m$을 부가하여 반력모멘트를 부가하지 않은 경우와 비교하였으며 온도구배는 벤딩 외측과 내측의 냉각수 분사각도, 파이프와 링과의 간극 및 냉각수 분사유무를 조정함으로서 부여하였다.

Fig. 3에 반력모멘트를 가하지 않은 경우와 두께 감소율 12.5%로 하기 위한 반력모멘트인 28898 $Kg_f \cdot m$를 가한 경우에 대한 벤딩각도에 따른 최대 두께감소율의 변화에 대한 실험결과를 나타낸다. 실험결과 반력모멘트를 가한 경우가 반력모멘트를 가하지 않은 경우에 비해 전체적으로 두께 감소율이 설계조건을 만족하는 범위에 존재하며 평균 최대 두께감소율이 11.83%로 유한요소해석결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 다음으로 유한요소 해석으로부터 평가된 온도구배에 따른 두께감소율을 실험을 통해 검증하였다. 실험은 반력모멘트를 부여한 경우와 반력모멘트와 온도구배를 동시에 부가한 경우에 대해 수행하였다. 실험결과 온도구배가 150℃인 경우의 평균 최대두께감소율은 7.91%이였으며 온도구배가 200℃인 경우에는 평균 최대 두께감소율이 6.55%이였다. 이 값은 설계조건인 12.5%보다 훨씬 작은 값으로 온도구배와 반력모멘트를 동시에 가한 효과임을 알 수 있었다. Fig. 4에 반력모멘트 및 온도구배 부여에 따른 실험결과를 나타낸다.

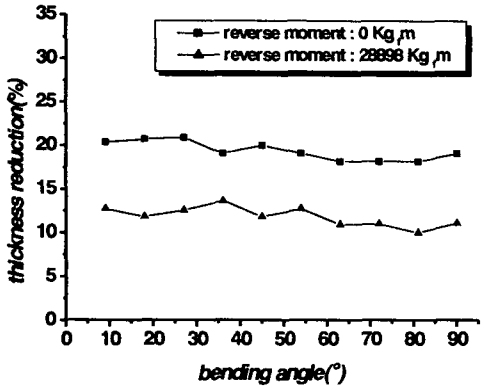


Fig. 3 Effect of the reverse moment in the pipe bending experiment

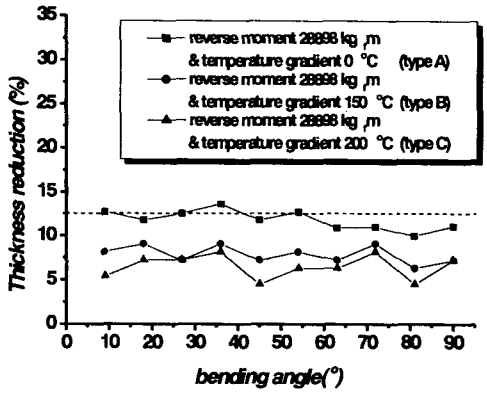


Fig. 4 Experiment results for each bending method

3. 결 론

본 연구에서는 설계조건을 만족하고 작은 곡률 반경을 가지는 파이프 벤드제품의 제작을 위한 고주파유도가열을 이용한 파이프 벤딩 공정 해석 및 설계를 수행하고 그 타당성을 검증하기 위해 동일한 조건하에서 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 파이프 벤딩 메커니즘을 이론적으로 규명하여 각 공정 변수들이 미치는 영향을 평가하여 벤딩조건에 따라 설계조건을 만족하기 위한 반력모멘트를 계산하였다. 또한 유한요소 해석을 통해 반력모멘트의 이론적 계산의 타당성을 밝혔으며 해석 결과 반력모멘트가 28898 $Kg_f \cdot m$ 이상이 되면 설계조건을 만족하는 파이프 벤드 제품이 생산이 가능함을 알 수 있었다.

(2) 온도구배의 경우 벤딩 외측과 내측의 온도차이가 250℃가 되면 역모멘트 부가 없이도 설계조건을 만족하는 제품을 생산할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 실험결과 반력모멘트 28898 $Kg_f \cdot m$와 온도구배 200℃를 동시에 가하였을 때 평균 최대 두께감소율은 6.55%으로 유한요소 해석결과와 잘 일치하였다. 또한 이 결과로부터 두께 감소를 최소로 하는 공정은 반력모멘트와 온도구배를 동시에 부여하는 공정임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) OKeefe W. : Inductive bending machine seeks to reduce number of welds in nuclear piping system, Power, 1(1977), pp.74-75

(2) Wang W. T., Hu Z. : Theory of pipe bending to a small bend radius using induction heating, J. Mater. Process. Technol., 21(1990), pp.275-284