<학술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.9.1059** ISSN 1226-4873

냉간 굽힘 가공된 곡관의 인장물성치 예측§

김진원*† · 이미연* · 이사용*
* 조선대학교 원자력공학과

Estimation of Tensile Properties of Pipe Bends Manufactured by Cold-Bending

Jin Weon Kim*†, Mi Yeon Lee* and Sa Yong Lee**
* Dept. of Nuclear Engineering, Chosun Univ.,

(Received April 19, 2012 ; Revised May 11, 2012 ; Accepted May 14, 2012)

Key Words: Pipe Bends(곡관), Cold Bending(냉간 굽힘), Tensile Property(인장물성치), Feeder Pipe(피더관), Heat-treatment(열처리)

초록: 본 연구에서는 냉간 굽힘 후 잔류응력 제거 열처리된 곡관에서 기계적물성치를 파악하기 위해서, 냉간 굽힘과 잔류응력 제거 열처리를 모사한 모사시편을 이용하여 인장시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 냉간 가공 후 잔류응력 제거 열처리를 수행할지라도 재료의 강도는 냉간 가공 전에 비해 증가하고 연성은 감소되는 것을 확인하였다. 또한, 강도 증가와 연성 감소는 냉간 가공시 적용된 변형률이 클수록 심화되었다. 따라서, 냉간 굽힘시 변형이 크게 발생하는 곡관의 외호부와 내호부는 직관에 비해 강도는 높고 연성은 낮을 것으로 예측되며, 곡관의 측면은 굽힘 가공 전의 직관과 유사한 기계적물성치를 보일 것으로 예측되었다.

Abstract: In this study, tensile tests were performed on specimens that simulated the cold-bending and heat-treatment of pipe bends to understand the mechanical properties of pipe bends manufactured by cold-bending followed by heat-treatment for relieving residual stress. The strength and ductility of cold-worked materials were respectively found to be higher and lower than those of the parent material although heat-treatment was carried out to relieve residual stress. In addition, the increase in strength and decrease in ductility were proportional to the applied strain levels for cold-working. It was thus inferred that the intrados and extrados regions of pipe bends that were cold-bended and heat-treated show higher strength and lower ductility compared to the parent straight pipe and that the mechanical properties at the crown region are nearly the same as those of the parent straight pipe.

1. 서 론

원자력발전소(이하 원전)는 수많은 배관들로 구성되어 있으며, 이들 배관에는 다양한 형태의 곡관이 사용되고 있다. 특히, CANDU형 원전의 피더관은 380 개의 핵연료 채널에 연결되어 핵연료에 냉각재를 공급하고 가열된 냉각재를 1차측 열수송계통 헤더로 이송하는 직경이 1.5 ~ 2.5inch 인 소구경 배관으로, 각 피더관에는 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 다양한 굽힘각의 곡관들이 설치되어 있다. 표준형 곡관은 일반적으로 열간 성형(Hot forming) 또는 열간 단조 (Hot forging) 방법으로 제작되며, 직관과 용접되어 배관 계통을 구성한다. 그러나, 피더관은 소구경이고 곡관부가 다양한 굽힘각을 갖기 때문에, 피더관의 곡관부는 표준형 곡관 대신 직관과 일체형으로 냉간 굽힘 후 잔류응력 제거 열처리하여 제작한다.[1,2] 따라서, 이와 같이 제작된 곡관은 임의의 굽힘각으로 제작이 가능하고 용접이 불필요한 장점이 있다. 그러나, 냉간 가공은 재료의 기계적 성질을 변화시키므로, 냉간 굽힘된 피더관의 곡관부는 열간 성형 또는 열간 단조된 표준 곡관에 비해

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2012. 4. 5.-6., 영남대학교) 발표논문임
† Corresponding Author, jwkim@chosun.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

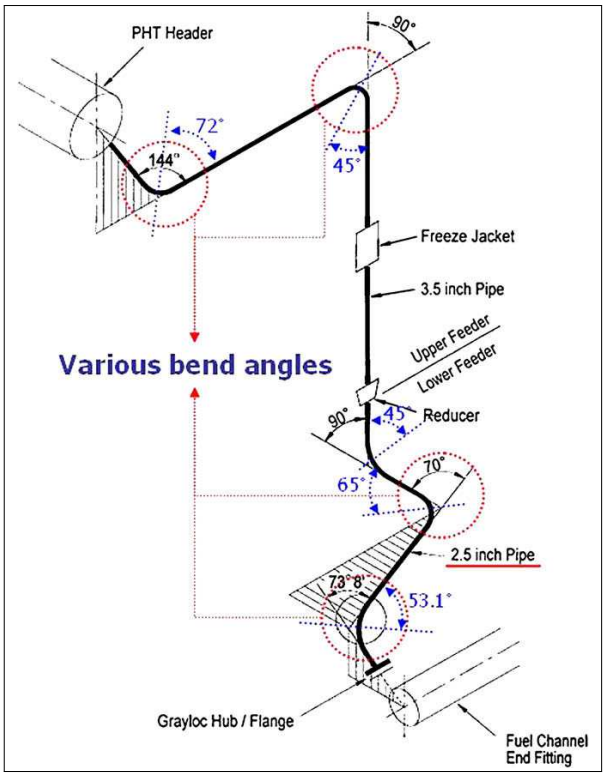
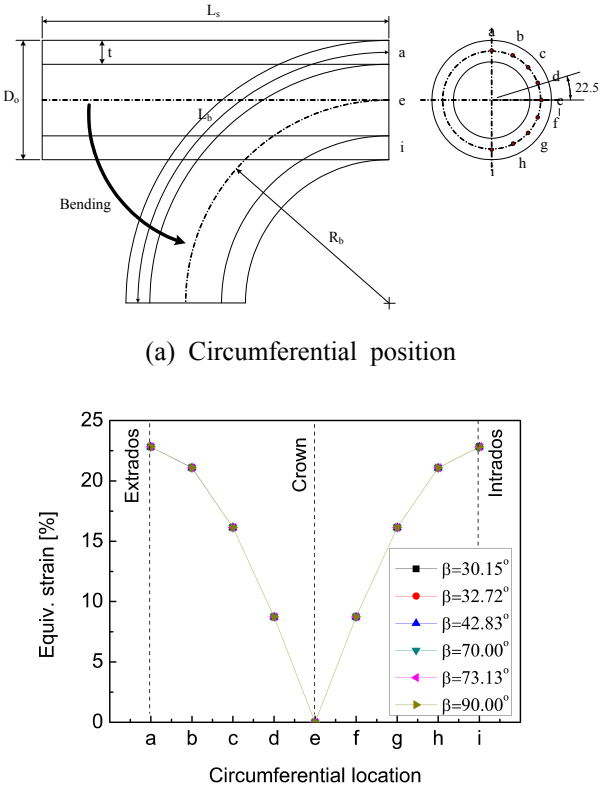


Fig. 1 A feeder pipe with various bend angles[4]



(a) Circumferential position

(b) Calculated strains

Fig. 2 Calculation of the equivalent strains developed in the pipe bends by cold bending

기계적물성치의 불균일성이 클 것으로 예상된다. 또한, 직관과도 기계적물성치의 차이가 클 것으로 예상된다.[3]

배관 계통에서 곡관부는 구조적으로 응력이 집중되고 난류 유동이 크게 발생하며 굽힘에 의한 높은 잔류응력을 보이므로,[5~7] 다른 부위에 비해 피로균열, 감육결함, 그리고 잔류응력에 의한 균열의 발생 가능성이 높다. 따라서, 곡관부 결함에 대한 신뢰성 있는 건전성 평가가 필요하며, 이를 위해서는 곡관부 결함에 적합한 신뢰성 있는 평가 방법과 함께 신뢰성 있는 재료물성치의 확보가 매우 중요하다. 그러나, 피더관과 같은 소구경 배관의 곡관부에서 직접 시편을 채취하여 재료물성치를 평가하는 것은 현실적으로 한계가 있다. 따라서, 일반적으로 직관의 기계적물성치를 곡관부의 결함 평가에 적용한다.[3] 그러나, 이와 같은 기계적물성치의 적용은 곡관부에서 재료물성치가 큰 편차를 보이는 경우에 평가 결과의 신뢰성을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 따라서, 냉간 굽힘 후 잔류응력 제거 열처리를 통해 제작된 곡관부의 기계적물성치를 정량적으로 파악하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 CANDU형 원전의 피더관과 같이 직관을 냉간 굽힘 후 잔류응력 제거 열처리한 곡관부의 기계적물성치를 파악하기 위해서, 냉각 굽힘과 열처리를 모사한 시편을 가공하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험 결과로부터 직관을 냉간 굽힘 후 잔류응력 제거 열처리하여 제작한 곡관부에서 예상되는 기계적물성치의 변화 정도와 곡관부에서 위치에 따른 기계적물성치의 편차를 정량적으로 살펴보았다.

2. 시편 및 시험 절차

2.1 곡관부 변형률 계산

모사시편을 설계하기 위해서 CANDU 피더관을 대상으로 냉간 굽힘시 곡관부에서 발생될 수 있는 변형률을 간단한 방법으로 계산하였다. 냉간 굽힘에 따른 변형률 평가를 위해서, 먼저 직경이 2.5inch, Sch.80인 직관 (D_o = 73.0 mm, t = 7.0 mm)을 굽힘 가공하는 것으로 가정하였으며 굽힘 후 곡관의 곡률반경 (R_b)이 96.4 mm인 것으로 가정하였다. 굽힘 가

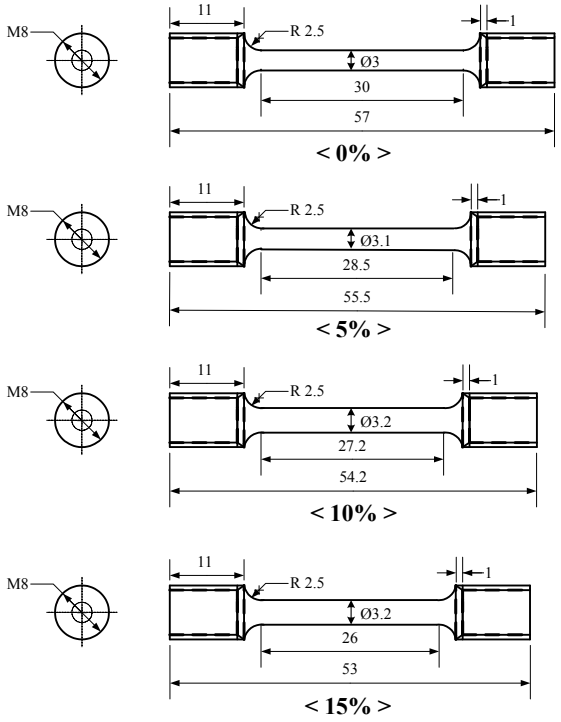


Fig. 3 Dimensions of simulated specimens

공시 곡관의 중심축 (Fig. 2에서 e 위치)을 중심으로 외호부 영역은 인장, 내호부 영역은 압축 형태의 변형이 대칭적으로 발생하는 것을 가정하였다. 또한, 굽힘 가공시 배관의 원주방향과 반경방향 변형은 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 즉, 직관을 냉간 굽힘하여 곡관을 제작할 때, 길이방향으로만 변형이 발생하는 것으로 가정하였다. 따라서, 굽힘 가공에 따른 곡관부의 등가 변형률 (ϵ_{eq})은 식 (1)과 같이 길이방향 변형률 (ϵ_1)만의 함수로 정리될 수 있다.[8] 곡관부의 길이방향 변형률은 식 (2)와 같이 직관 상태의 배관 길이 (L_S)와 굽힘 가공후 곡관 상태에서 호의 길이 (L_b)로부터 계산된다. 곡관 상태에서 호의 길이는 곡관의 원주방향 위치에 따라 차이를 보이므로, 여기서는 Fig. 2(a)에 나타낸 것과 같이 원주방향으로 22.5°씩 등분하고 각 위치별로 호의 길이를 구하여 등가 변형률을 계산하였다. 등가 변형률 계산에는 CANDU 피더관에 존재하는 곡관의 다양한 굽힘각 (β)을 고려하였다.

$$\epsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3}\left[(\epsilon_1-\epsilon_2)^2+(\epsilon_2-\epsilon_3)^2+(\epsilon_3-\epsilon_1)^2\right]^{1/2} = \frac{2}{3}\epsilon_1 \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \frac{(L_b - L_s)}{L_s} \quad (2)$$

Fig. 2(b)는 곡관부에서 계산된 등가 변형률을 곡관의 원주방향 위치에 따라 나타낸 것으로, 등가 변형률은 곡관의 측면에서 0 %로 최소이며, 곡관의 외호부와 내호부에서 약 23 %로 최대를 보였다. 전체적으로 굽힘 가공에 따른 곡관부의 등가 변형률은 약 0 ~ 23 %의 범위로 평가되었으며, 이들 변형률은 곡관의 굽힘각에 관계없이 모두 같은 값을 보였다. 그러나, 실제 직관을 냉간 굽힘하는 경우에는 길이방향 뿐 아니라 원주방향과 두께 방향으로 변형이 발생하며 곡관의 단면이 타원형 형태로 변형되기도 한다.[6] 냉간 굽힘에 따른 곡관부의 잔류응력 평가를 위해 수행된 연구 결과에 의하면, 굽힘 가공에 따른 길이방향 변형률은 -42 ~ 34 %, 원주방향 변형률은 -25 ~ 13 %인 것으로 계산되었다.[6] 여기서 주어진 길이방향 변형률과 원주방향 변형률을 각각 34 %와 13 %로 가정하여 곡관의 외호부에서 등가 변형률을 계산하면 19.4 %로 주어진다. 따라서, 본 연구에서 간단히 계산된 등가 변형률이 실제 곡관에서의 변형률과 정확히 일치하지는 않지만, 어느 정도 타당한 계산 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 이들 결과를 이용하여 모사시편을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 모사시편의 설계 및 제작

앞서 계산된 등가 변형률을 바탕으로 인장시편 형태의 모사시편을 설계·가공하였다. 상온에서 시편에 일정한 크기의 인장변형을 가함으로써 냉간 굽힘에 의한 냉간 가공을 모사하였다. 시편은 피더관과 동일한 재료인 ASTM A106 Gr. B 직관에서 축방향으로 채취하였다. 냉간 가공을 모사하기 위해 시편에 가해진 변형률 (ϵ_{CW})은 각각 5 %, 10 %, 15 %이다. 앞서 굽힘 가공에 의해 곡관부에서 발생될 수 있는 변형률은 위치에 따라 0 ~ 23 % 범위로 예측되었다. 그러나, 인장시험 결과에서 ASTM A106 Gr. B는 약 15 ~ 17 %의 변형률에서 네킹이 발생하므로, 여기서는 냉간 가공을 위해 최대 15 %의 변형률을 시편에 적용하였다. 시편은 봉상으로 가공되었으며, 시편의 초기 형상은 냉간 가공시 시편에 가해질 변형률에 따라 약간씩 다르게 설계하였다. Fig. 3은 설계된 시편의 초기 형상을 나타낸 것이다.

일정한 크기의 변형률로 냉간 가공된 각 시편은 잔류응력 제거를 위해 열처리되었다. 열처리

Table 1 Matrix of tensile tests for simulated specimens

$[\epsilon_{CW}\%]$	Duration of heat-treatment [hr]			Etc.
0	-	-	-	As-receive
5	0.0	0.5	1.0	Cold-work & Heat-treatment
10	0.0	0.5	1.0	Cold-work & Heat-treatment
15	0.0	0.5	1.0	Cold-work & Heat-treatment

온도는 620 °C이며, 열처리 시간으로는 30 분 (0.5 hr)과 1 시간 (1.0 hr)이 각각 고려되었다. 열처리 온도와 시간은 CANDU 피더관의 제작시 고려된 지침에 따라 결정되었으며, 지침에는 608 ~ 635 °C에서 0.5 hr 이상을 유지하도록 요구하고 있다.[1]

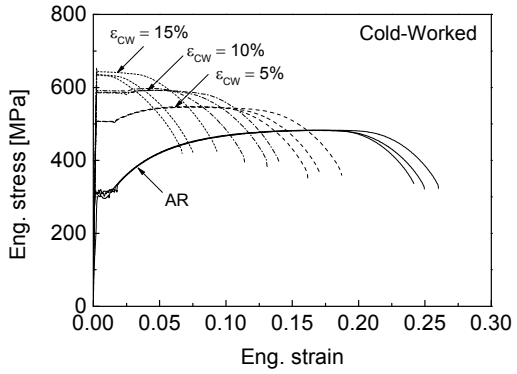
2.3 인장시험

냉간 가공되지 않은 시편 (As-received, AR)과 일정한 크기의 변형률로 냉간 가공된 시편, 그리고 변형 후 잔류응력 제거를 위해 열처리된 시편으로 구분하여 인장시험을 수행하였다. 구체적인 시편 조건은 Table 1에 정리된 바와 같다. 시험은 상온의 준정적 하중속도 ($2.6\times10^{-4}/s$)에서 각 조건 별로 3 회씩 수행되었다. 시험에는 1 ton 로드셀이 부착된 기계식 만능시험기가 사용되었으며, 게이지 길이가 25 mm인 신율계를 사용하여 변형률을 측정하였다.

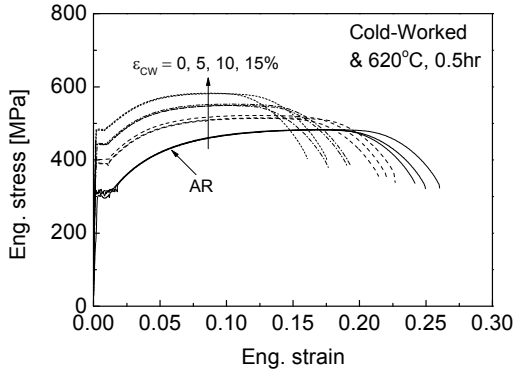
3. 시험 결과 및 토의

3.1 응력-변형률 거동

Fig. 4는 5 %, 10 %, 15 %씩 냉간 가공된 시편과 냉간 가공 후 잔류응력 제거 열처리를 수행한 시편에 대한 인장시험 결과로 주어진 공칭응력-공칭변형률 곡선을 냉간 가공되지 않은 시편(AR 시편)의 공칭응력-공칭변형률 곡선과 함께 나타낸 것이다. 냉간 가공된 경우 시편에 가해진 변형률이 증가함에 따라 공칭응력-공칭변형률 곡선에서 전체적으로 강도는 증가하고 연성은 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4(a)). 또한, 냉간 가공에 적용된



(a) As cold-work

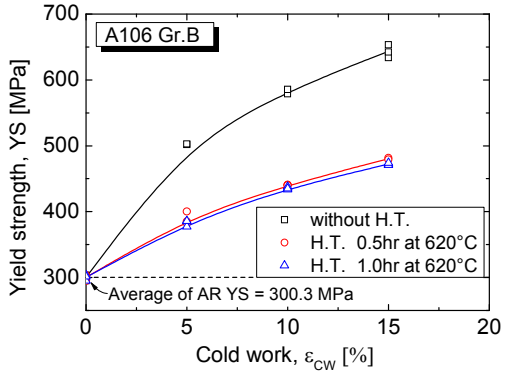


(b) As cold-work and heat-treatment

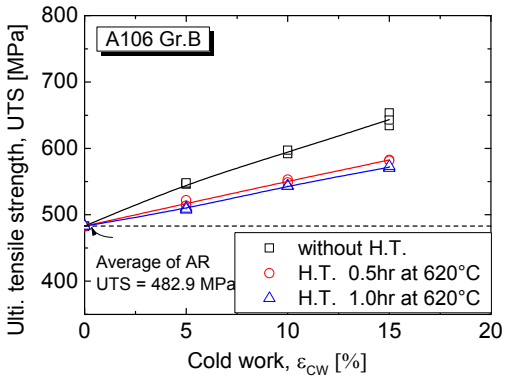
Fig. 4 Engineering stress vs. strain curves of simulated specimens

변형률이 증가함에 따라 재료의 가공경화 능력과 균일 연신율이 급격히 감소하였다. 따라서, 10 % 이상 냉간 가공된 경우에는 공칭응력-공칭변형률 곡선에서 가공경화 현상이 거의 나타나지 않았으며, 심지어 15 % 냉간 가공된 시편에서는 소성변형이 시작됨과 동시에 네킹이 발생하였다.

한편, Fig. 4(b)에 나타낸 것과 같이 냉간 가공된 시편을 620°C에서 0.5 hr 동안 열처리한 경우에 변형 거동이 AR 시편과 거의 유사하였다. 15 % 냉간 가공된 경우에도 AR 시편과 유사한 가공경화 거동을 보였으며 10 % 정도의 소성변형 후에 네킹이 발생하였다. 그러나, 강도 증가와 연성 감소 정도가 냉간 가공된 상태에 비해 약화되었지만, AR 시편과 비교하면 여전히 높은 강도와 낮은 연성을 보였다. 따라서, 잔류응력 제거 열처리를 통해 냉간 가공된 시편의 변형 거동이 어느 정도 회복되지만, 냉간 가공 이전 상태로 완전히 회복되지는 않는 것을 알 수 있다.

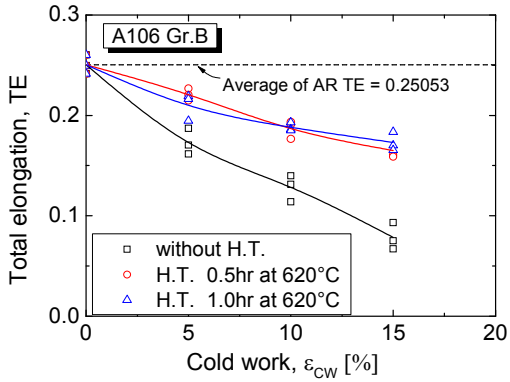


(a) Yield strength

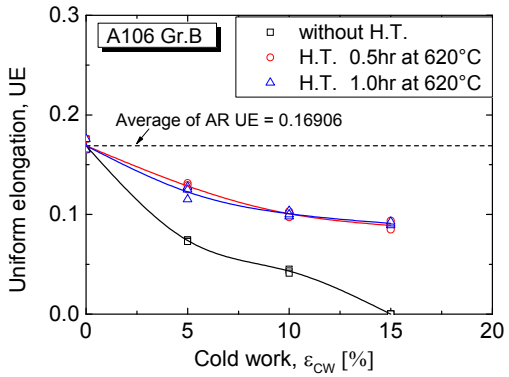


(b) Tensile strength

Fig. 5 Changes in the strengths of materials after cold-work and cold-work followed by heat-treatment



(a) Total elongation



(b) Uniform elongation

Fig. 6 Changes in the ductilities of materials after cold-work and cold-work followed by heat-treatment

3.2 강도와 연성 변화

Fig. 5는 모사시편에 대한 인장시험 결과로부터 주어진 항복강도와 인장강도를 시편 조건에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 5 %, 10 %, 15 % 냉간 가공된 경우에 변형 전에 비해 항복강도는 각각 67 %, 100 %, 116 %까지 증가하였으며, 인장강도는 약 14 %, 24 %, 30 % 정도 증가하였다. 또한, Fig. 6에 나타낸 것과 같이 총 연신율은 냉간 가공에 적용한 변형률에 따라 변형 전 값의 70 %, 50 %, 30 % 수준으로 감소하였으며, 균일 연신율은 변형 전 값의 40 %, 20 %, 0 % 수준까지 감소하였다. 따라서, 냉간 가공에 의해 ASTM A106 Gr. B 배관재의 강도는 뚜렷이 증가하고 연성은 감소하였다. 특히, 항복강도의 증가와 균일 연신율의 감소가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이들 기계적물성치의 변화는 냉간 가공시 가해진 변형률의 크기에 따라 거의 선형적으로 증가하였다.

한편, Figs. 5와 6에서 알 수 있는 것과 같이 냉간 가공에 의해 변화된 기계적물성치는 잔류응력 제거 열처리를 통해 회복되었다. 그러나, 이들 기계적물성치는 냉간 가공 이전 상태 (AR 시편 상태)로 완전히 회복되지 않고, 냉간 가공에 의해 변화된 기계적물성치의 약 50 % 정도가 회복되었다. 따라서, 냉간 가공 후 잔류응력 제거 열처리된 시편의 항복강도는 냉간 가공 전 AR 시편과 비교하여 30 ~ 60 % 정도 증가되었으며, 인장강도는 7 ~ 18 % 정도 증가하였다. 또한, 잔류응력 제거 열처리된 시편의 총 연신율은 냉간 가공 전 AR 시편의 70 ~ 90 % 수준이었으며, 균일 연신율은 냉간 가공 전 값의 50 ~ 80 % 수준을 보였다. 잔류응력 제거 열처리를 통한 기계적물성치의 회복 정도는 냉간 가공시 시편에 가해진 변형률 크기에 관계없이 유사하였으며, 열처리 후 기

계적물성치의 변화 정도는 냉간 가공시 적용된 변형률에 비례하여 증가하였다. 또한, 잔류응력 제거 열처리에 의한 기계적물성치의 회복 정도는 열처리 시간에 관계없이 거의 유사하였다. 이것은 본 실험에서 적용한 두 조건의 열처리 유지시간이 지침의 요구 조건(30분 이상)을 만족하기 때문으로 판단된다.

3.3 곡관부의 기계적물성치 예측

모사시편을 이용한 인장시험 결과로부터 냉간 굽힘 후 잔류응력 제거 열처리된 CANDU 피더관 곡관부의 기계적물성치를 예측해 보면, 전체적으로 곡관부의 강도는 직관보다 높고 연성은 직관보다 낮을 것으로 예상되었다. 특히, 항복강도의 증가(약 60 % 이상)와 균일 연신율의 감소(약 50 % 이상)가 뚜렷할 것으로 예측된다. 강도와 연성의 변화로부터 판단하면, 곡관부의 인성 역시 직관에 비해 낮을 것으로 예상된다. 또한, 곡관부에서 기계적물성치는 원주방향 위치에 따라 차이를 보이며, 굽힘 가공시 변형이 크게 발생하는 곡관의 외호부와 내호부가 직관에 비해 뚜렷이 높은 강도와 낮은 연성을 보일 것으로 예측되고, 곡관의 측면은 직관과 거의 유사한 기계적물성치를 보일 것으로 예측되었다. 또한, 만약 곡관이 굽힘 가공 후 잔류응력 제거 열처리를 수행하지 않았다면, 잔류응력 제거 열처리된 곡관부에 비해 강도 증가와 연성 감소가 2 배 이상일 것으로 판단되며, 곡관부에서 위치에 따른 기계적물성치의 편차도 2 배 이상일 것으로 예측된다.

4. 결 론

본 연구에서는 직관을 냉간 굽힘 후 잔류응력 제거 열처리하여 제작된 곡관부의 기계적물성치를 예측하기 위해서, 냉각 굽힘과 열처리를 모사한 시편을 가공하여 인장시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 잔류응력 제거 열처리를 수행하는 경우에 냉간 가공에 의해 증가된 강도와 감소된 연성이 회복되었다. 그러나, 냉간 가공 이전에 비해 여전히 높은 강도와 낮은 연성을 보였다.

(2) 냉간 가공 후 잔류응력 제거 열처리된 시편에서 강도와 연성의 변화는 냉간 가공시 적용된 변형률 크기에 거의 비례하였다.

(3) 잔류응력 제거를 위해 30분 이상 열처리된 경우에는 열처리 시간에 관계없이 기계적물성치의 회복 정도가 거의 유사하였다.

(4) 냉간 굽힘 후 열처리된 피더관 곡관의 외호부와 내호부는 직관에 비해 높은 강도와 낮은 연성을 보이며, 곡관의 측면은 직관과 유사한 기계적물성치를 보일 것으로 예측되었다.

참고문헌

(1) KEPRI, 2005, "Development of Enhanced Performance Technology for PHWR Plant Operation-Development of Prediction and Control Technology for Aging of Feeder Piping, *Final Report (GOVP1200510837)*

(2) KHNP, 2002, "Development of Technologies to Monitor for Feeder Thinning of CANDU Nuclear Power Plants," *Final Report (99NS10)*

(3) Duan, X., Kozluk, M.J., Gendron, T. and Slade, J., 2011, “Alternative Methodology for Assessing Part-Through-Wall Cracks in Carbon Steel Bends Removed From Point Lepreau Generating Station,” *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 241, pp. 630~637.

(4) Jang, Y.S., Kim, S.H., Chang, H.S., Lee, S.M., Choi, J.B., Kim, Y.J. and Choi, Y.H., 2008, “Fluid Effects on Structural Integrity of Pipes with an Orifice and Elbows with a Wall-Thinned Part,” *J. of Loss Prev. in the Proc. Industries*, pp. 1~6.

(5) Chexal, B., Horowitz, J,. Dooley, B., Millett P., Wood, C. and Jones, R., 1998, “Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant,” *EPRI/TR-106611-R2*.

(6) Yetisir, M, Donaberger, R. and Rogge, R., 2006, “Residual Stresses in CANDU Feeder Bends - Effect of Bend Radius,” *Proc. of PVP2006-ICPVT-11*, PVP2006-ICPVT-11-93407.

(7) Takahasi, K., Watanabe, S. ando, K., Urabe, Y., Hasatune, M., Miyazaki, K., 2009, “Low Cycle Fatigue Behaviors of Elbows Subjected to Seismic Loading,” *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 239, pp. 2719~2727.

(8) Diter, G.E., 1988, Mechanical Metallugy, SI Metric Ed., McGraw-Hill