

대 직경 이음매 없는 Ti-6Al-4V 튜브의 360° 냉간 굽힘

360° Cold Bending of Ti-6Al-4V Large-Diameter Seamless Tube

허 선 무* 박 종 승**
Hur, Sun-Moo, Park, Jong-Seung

ABSTRACT

360° bending of Ti-6Al-4V large-diameter seamless tube(62.37 mm OD x 4.40mm wall thickness) has been achieved at room temperature without heating. The bending process comprised two steps : the first step is 360° bending by an uniquely designed rotary bender allowing spring back, which is subsequently eliminated by the second or finishing step which comprised repeated bending processes by powered three roll bender. In order to prevent collapse of tube during bending, Cerro Tru™(Trade name of a non-ferrous low melting point alloy)has been employed as a filler metal. The resultant ovality(out of roundness) obtained was 1.28%, as compared with 6~8% without applying Cerro Tru™.

주요기술용어 : Cold Bending(냉간 굽힘), Seamless Tube(이음매 없는 튜브), Rotary Bender(회전식굽힘기), Spring Back(스프링 백), Powered Three Roll Bender(동력식 삼롤식 굽힘기), Cerro Tru™(세로 투루), Ovality(진원도)

1. 서 론

Ti-6Al-4V(Ti-64) 합금의 이음매 없는 튜브의 생산은 최근⁽¹⁾에 이루어 졌다. 이 합금은 1970년대 이래로 표준 타이타늄 유압용 튜브로 사용되어 온 Ti-3Al-2.5V에 비해 강도,따라서 비 강도,즉 강도 대 비중 비율이 20~30% 더 높다.

Ti-64 합금과 관련 중요한 단점⁽²⁾ 중 하나는 상온에서의 열악한 성형성, 특히 상온에서의 대 직경 이음매 없는 튜브의 열악한 굽힘성이다. (연구)자료⁽³⁾에 의하면 Ti-64보다 훨씬 더 연성이 좋은 상업적으

로 순 타이타늄 조차도 직경 63.5mm 이상의 크기에 대해서는 가열해야만 굽힘을 위한 최선의 연성을 갖는다. 대 직경 이음매 없는 Ti-64 튜브 굽힘에 대해서는 아무런(연구)자료^{(4),(7)}가 알려져 있지 않다. 그러나 500℃ 이상의 온도는 해로우며 알파 피막의 생성과 이온 이의 세척과 관련 복잡한 문제를 일으키며 그렇지 않으면 불활성 가스나 진공 등 제어된 분위기에서의 성형이 필요하다.

이 글에서는 가열 없이 상온에서 Ti-64 대직경 이음매 없는 튜브(62.37mm 외경 x 4.40mm 벽두께)의 360도 굽힘이 기술될 것이다.

항공 우주용에서 실질적인 튜브 굽힘의 진원도⁽⁷⁾ [진원에서 벗어난 정도, $\% = 100 \times (D_{max} - D_{min}) / D_{nom}$, $D_{nom} =$

* 국방과학연구소 기술연구본부 5부 책임연구원

** 국방과학연구소 제3체계개발본부 1부 선임연구원

$(D_{max}+D_{min})/2$, 여기에서 D_{max} 과 D_{min} 은 각각 튜브의 최대 및 최소직경을 나타낸다. 이 한계 또한 Ti-64 합금의 성형성에 의해 영향을 받는다. 납과 모래⁸⁾가 Ti-64 합금의 진원도 개선을 위한 충전재로 사용될 수 있다.

모래는 큰 직경과 두께를 갖고있는 Ti-64 튜브경우에는 그러한 목적으로는 비효과적임이 밝혀졌다. 그러나 납(표 3)은 340°C의 높은 용점과 11.34g/cm³의 비중을 갖고 있어 더 높은 작업온도와 취급상 어려움이 요구되고 있다.

Cerro TruTM(표 3, 저 용점 비철계 합금의 상품명)가 굽힘 도중 튜브의 이그러짐을 방지하기 위한 충전재로 성공적으로 사용된 적이 있으며, 그 공정이 또한 이 글에서 기술 될 것이다.

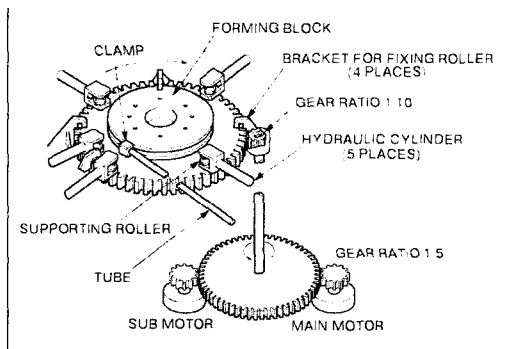
그 굽힘 공정은, 두 단계로 나뉘어져 있는바, 그 첫 단계는 고유하게 설계된 회전 굽힘기에 의한 360도 굽힘으로 스프링 백이 생기며, 이 스프링 백은 이어서 동력식 세 개 롤러에 의한 제어된 작은 변형율을 적용, 여러 번의 반복 굽힘 공정으로 이루어지는 두 번째 단계 또는 완성단계에서 제거되는 바, 이 공정이 기술될 것이다. 또한 고유하게 설계된 동력식 360도 회전 굽힘 기계도 간략하게 기술 될 것이다.

2. 동력식 360도 회전 굽힘 기계

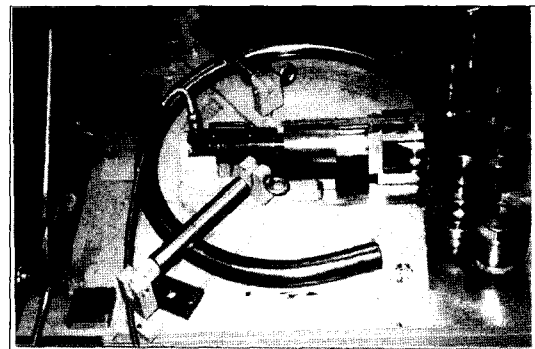
그림 1은 대 직경 및 두꺼운 벽두께의 고강도 합금 튜브의 360도 굽힘 용으로 고유하게 설계된 동력식 회전기계의 모사도를 나타내고 있다. 이 굽힘기는 다섯 개의 주요 구성 품으로 이루어져 있다; 1) 한 개의 성형 블록, 2) 유압식으로 피스톤 스트로크를 조정 가능한 다섯 개의 받침 롤러, 3) 하나의 잠금 블록, 4) 구동 모터 및 기어를 포함하는 하나의 구동시스템, 5) 하나의 유압제어 시스템, 성형 블록과 받침 롤러의 표면은 연마 후 경화처리 되었다.

튜브의 굽힘 반경이 그 반경에 해당되는 성형 블록에 고정시킨 튜브는 유압모터에 의해 구동되는 성형 블록을 회전시켜 변형시키게 된다. 그 크기가 굽힘에 소요되는 토크의 크기, 즉 튜브의 유동 변형 저항력에 의해 정해지는시스템 압력은 펌프의 출구에서의 릴리프 밸브에 의해 설정되게 된다. 모터 속도 따라서 성형 블록의 회전속도는 가변 펌프유속의 수동적 조정에 의해 제어된다.

그림 1에 표시된 바와 같이, 변형되는 물건(튜브)은, 유압유의 방향을 수동 제어하여 앞,뒤 방향으로 조정되는 받침 롤러에 의해 지지 되고 있다. 이런 식



[그림 1] 대 직경 두꺼운 벽두께의 고 장력 재료의 360도 굽힘을 위해 설계된 동력식 360도 굽힘 기계의 모사도



[그림 2] 동력 회전식 굽힘 기계(그림1)에서의 1단계 굽힘으로 얻어진 튜브의 스프링 백을 제어된 변형율을 적용 제거하기 위한 삼롤러 굽힘 기계

으로 성형 블록이 360도 회전, 튜브의 360도 굽힘의 1단계가 이루어지게 된다. 360도 굽힘의 1단계로부터 남겨진 스프링 백은 그 다음 통상⁽⁶⁾의 동력식 세 개 롤러 굽힘 기계와 같은 기계에서 반복된 굽힘 공정으로 구성되는 2단계 또는 완성단계에 의해 제거 되게 된다. 그림 2는 동력식 세 개 롤러 굽힘기를 보여 주고있다.

3. Ti-64 대 직경 이음매 없는 튜브

표 1은 사용된 이음매 없는 튜브의 화학성분을 Ti-3Al-2.5V의 성분과 비교하여 표시하였다. 표 2는 Ti-64 이음매 없는 튜브 소재의 크기와 기계적 성질을 Ti-3Al-2.5V의 기계적 성질과 비교하여 표시하였다.

(표 1) 이음매 없는 튜브의 화학적 성분(%)

성분 \ 합금	Ti-6Al-4V	Ti-3Al-2.5V
C	0.026~0.036	0.5
Al	6.43~6.58	2.5~3.5
V	4.17~4.30	2~3
Fe	0.20~0.21	0.3
O	0.18~0.20	0.12
N	0.024~0.028	0.02
H	0.0033	0.015
Ti	나머지	나머지
Other Total	0.09	0.4
비 고	Y,0.0010	Y,0.005 AMS4943D

(표 2) 이음매 없는 튜브의 기계적 성질

합금 \ 성질	UTS (MPa)	0.2%YS (MPa)	EI (%)	RA (%)
Ti-64*, A	1,018.5	936.6	16.4	42.0
Ti-3Al-2.5V AMS4943D,A	620.0	515.0	15.0	-

* 외경=62.37mm, 벽두께=4.4mm(±10%)

4. Ti-64 대 직경 이음매 없는 튜브의 360도 냉간 굽힘

그림 3은 Ti-64 대 직경 이음매 없는 튜브의 360도 냉간 굽힘 공정의 흐름도를 표시한다.

폴림 처리된 Ti-64 튜브에 세로 투루(CTTM, 표 3)를 채워 넣는다. CTTM로 채워 넣은 폴림 처리된 Ti-64의 1단계 굽힘이 가열 없이 상온에서 동력 회전식 360도 굽힘 기계에서 수행된다.

굽힘 도중 적용된 윤활유는 CASTROL HYSPIN VG46 이었다. 성형기 굽힘 회전 속도는 0.05~0.3 rpm, 대체로 0.1 rpm였다. Ti-64 대 직경 이음매 없는 튜브의 360도 냉간 굽힘에 소요되는 구동 모터 유압 장치의 최대압력은 65kgf/cm²이었다.

순서	공정 내용
1	Ti-64 이음매 없는 튜브(Annealed)
2	한쪽 끝을 막은 튜브에 CERRO TRU TM 를 용해 주입(150℃)
3	360도 냉간 굽힘 : 스프링 백 (1단계: 동력 회전식 굽힘 기)
4	스프링 백 제거: 변형을 제어 (2단계 또는 완성단계: 삼-롤식 굽힘기)
5	마개제거 후 CERRO TRU TM 용출
6	질 불산 용액에서 세척
7	내시경 검사
8	형광침투검사(굽힘 균열 색출)
9	360도 굽힌 Ti-64 이음매 없는 튜브(응력 제거 열처리 대기)

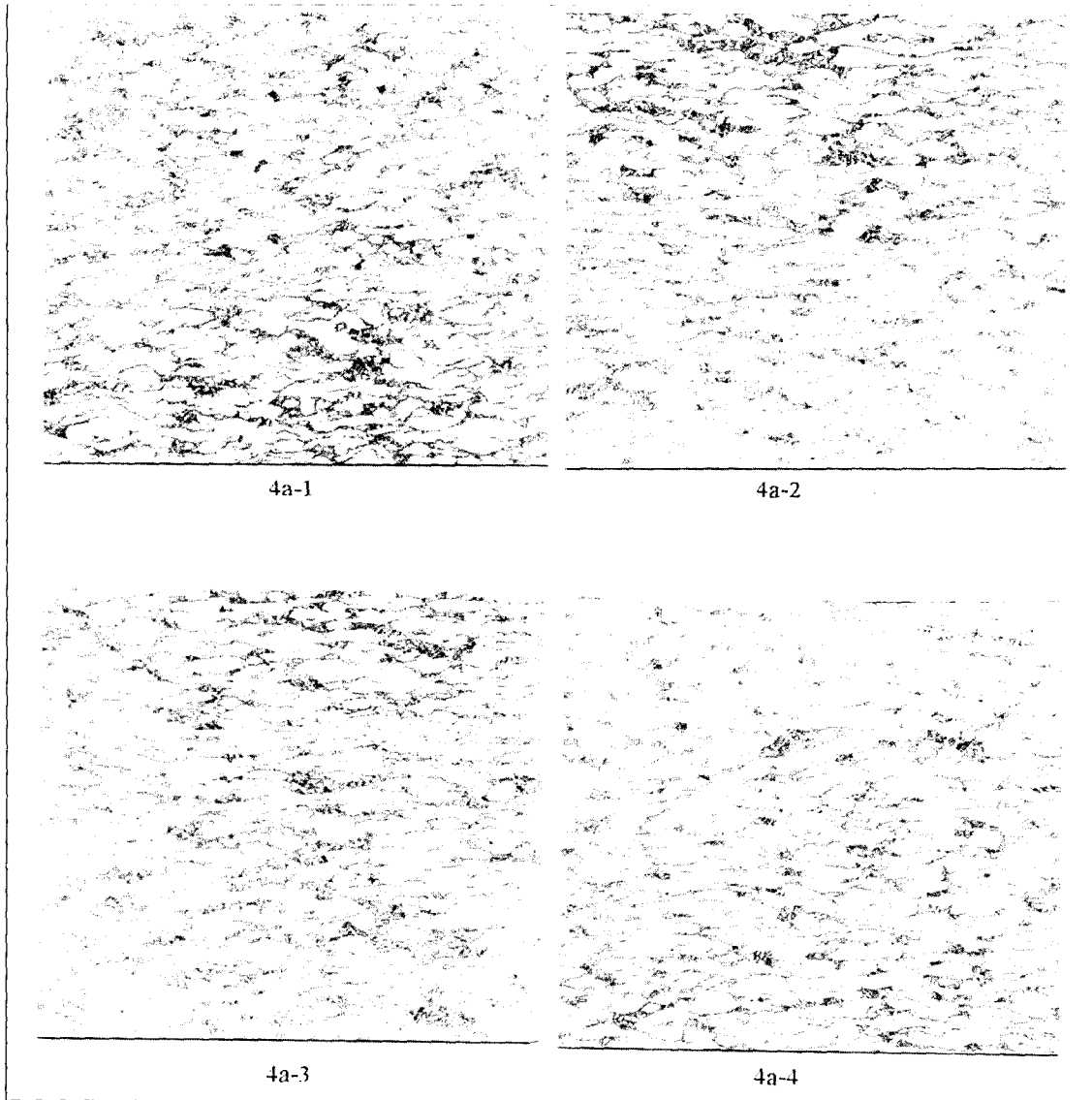
(그림 3) Ti-64 대 직경 이음매 없는 튜브 360도 냉간 굽힘 공정 흐름도.

4.1 스프링 백의 제거

1단계 굽힘을 마친 후, 스프링 백은 받침 롤러(그림 1)를 제거 후 튜브 두 끝 사이의 거리를 나타내는

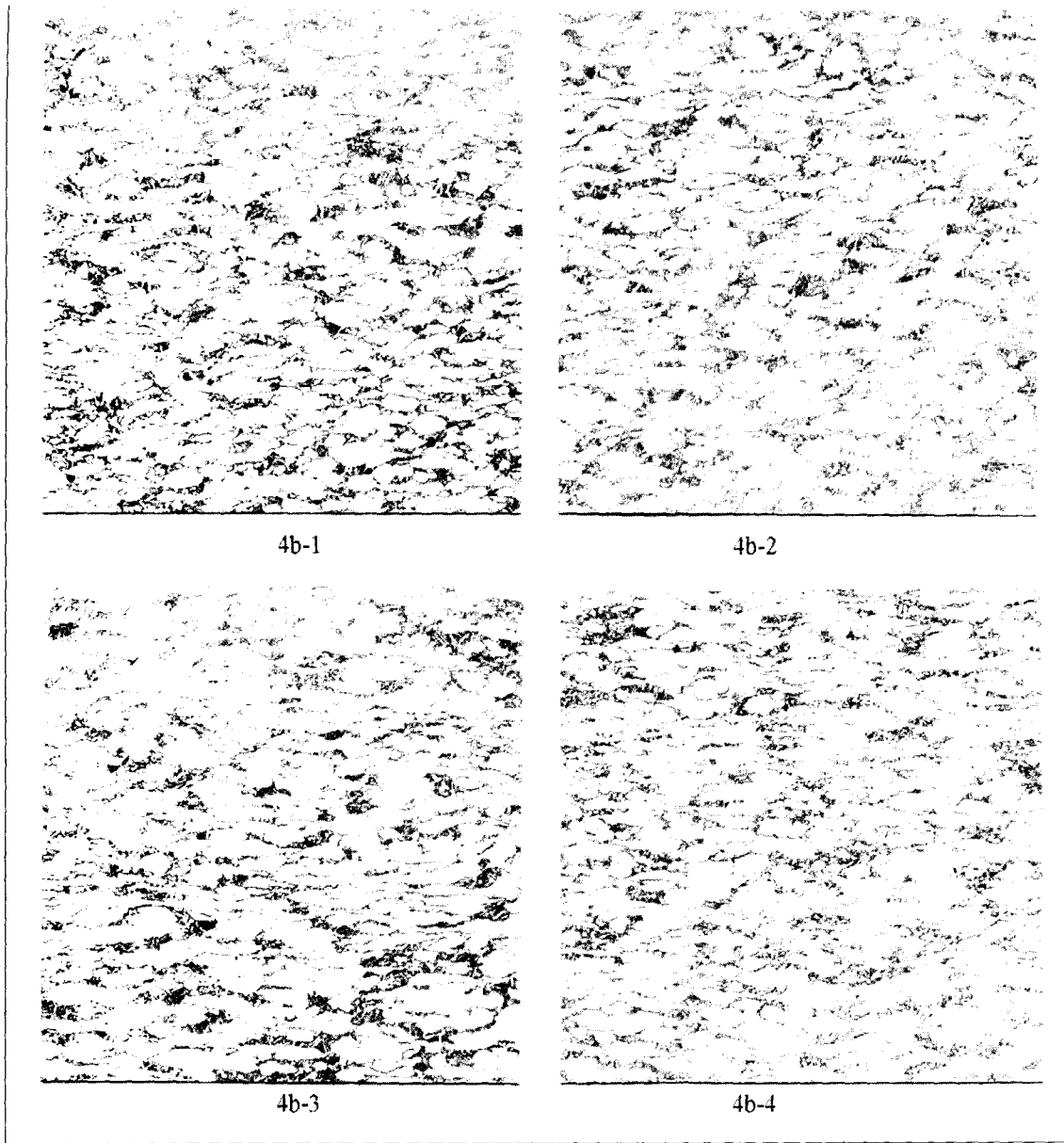
바, 이는 345mm였으며, 바로 이어서 이는 세 개 롤라 굽힘 기계(그림 2)의 조정 롤라의 실린더 램의 길이를 증가 시켜 이전 단계에서 굽혀진 튜브의 곡을

반경을 조금 씩 줄여가면서 34회 반복 굽힘 처리하는 2단계(굽힘)에서 제거된다.



60 μ

(그림 4a) 플립 처리된 Ti-64 이음매 없는 튜브의 굽힘 공정 이전의 단면 미세 조직. 여기서 4a-1은 튜브 원주방향으로 단면의 상부, 4a-3은 하부, 4a-2는 외부, 4a-4는 내부의 각각 90도 간격의 위치에서의 조직을 각각 나타낸다.



60 μ

(그림 4b) 풀림 처리된 Ti-6Al-4V 이음매 없는 튜브의 굽힘 공정 이후의 단면 미세 조직. 여기서 4b-1은 튜브 원주 방향으로 단면의 상부, 4b-3은 하부, 4b-2는 외부, 4b-4는 내부의 각각 90도 간격의 위치에서의 조직을 각각 나타낸다.

(표 3) 세로 투루(CT™)의 성질.()안의 값은 납의 수치를 나타낸다.

성분	58%Bi,42%Sn
밀도(g/cm ³)	8.7(11.34)
용점(°C)	138(340)
인장강도(MPa)	56

4.2 세로 투루 적용을 통한 진원도의 개선

튜브의 진원도⁽⁷⁾(진원에서 벗어난 정도)는 각 굽힘 단계 전,후 측정 되었다. 세로 투루의 적용을 통한 진원도의 개선 결과를 표 4에 표시 하였다. Ti-64 튜브 굽힘 후의 진원도 요구 조건은 정해진 바가 없다⁽⁶⁾⁽⁷⁾. 그러나 상업적 순 타이타늄(CP Ti) 경우 그것은 3%⁽⁷⁾이다. Ti-64 튜브의 진원도는 세로 투루를 적용하지 아니 하고 360도 굽혔을 때 7.16% 인데 비해, 세로 투루 적용 후 굽힌 경우는 1.28%였다. 공정간 세로 투루와 Ti-64 튜브간에는 아무 반응도 일어나지 아니 하였다. 세로 투루 제거 후 튜브 표면은 질 불산 용액에서 세척되었다. 그리고 튜브의 내면을 내시경을 통해 육안검사를 실시하였다. 마지막으로 굽혀진 튜브의 균열 검사를 위해 침투검사가 실시되었다.

(표 4) 튜브의 진원도 측정값

		진원도 (%)	비 고
기준 ⁽⁷⁾		3, 순Ti	Ti-64 기준 미설정
CT™ 충진 Ti-64 튜브	시작 재	0	이음매 없는 튜브
	1단계	0.96	
	2단계	1.28	
			CT™ 미 충진시 7.16%

4.3 굽힘에 의한 미세 조직 변화와 향후 연구를 위한 제언

그림 4는 360도 굽힘을 위해 사용된 폴립 처리된

Ti-64이음매 없는 튜브의 굽힘 전,후의 미세 조직을 나타낸다. Ti-64 이음매 없는 튜브의 굽힘 후 원래 알파(그림 4b에서 흰색 부분) 결정립(모양)이 비 규칙적으로 늘어난 것은 굽힘 변형 중 기하학 적인 구속 인자로 인한 불규칙적 변형이 반영된 것이다. 굽혀진 튜브의 벽두께 변화와 미세 조직(그림 4b-1,4b-4)을 분석하면 벽 두께가 얇아지는 현상이 있었음을 보여주는 바, 이는 본 연구의 범위를 벗어나며 향후 정량적으로 더 연구가 이뤄 져야 한다. FEM⁽¹⁰⁾분석으로 대 직경 이음매 없는 튜브의 냉간 굽힘을 위한 최적의 조건을 제시할 수도 있다.

그림 5는 상온에서 360도 굽혀진 대 직경의Ti-64 이음매 없는 튜브를 보여 준다.



(그림 5) 가열 없이 상온 360도 굽힘 공정 종료 후 Ti-6Al-4V 이음매 없는 튜브

5. 결 론

1. Ti-6Al-4V 대 직경 이음매 없는 튜브(외경 62.37mm, 벽두께 4.40mm)의 360도 냉간 굽힘이 상온에서 가열 없이 가능하다.
2. 굽힘 중 튜브의 이그러짐을 방지하기 위해 Cerro Tru™가 충진 재로서 최초로 적용되었고 대 직경 이음매 없는 튜브(외경 62.37mm,벽두께

4.40mm)의 360도 냉간 굽힘 시 최종 진원도는, Cerro Tru™를 사용하지 않을 경우 7.16%에 비해, 1.28% 였다.이 사실로 봐서 Cerro Tru™는 고 강도 타이타늄 합금의 진원도 개선을 위해 유용한 충전 재료 이다.

3. 고유하게 설계된 동력 회전식 굽힘 기계는 대 직경 및 큰 벽두께의 고 강도 합금의 360도 냉간 굽힘을 위해 성공적 이였다.

참 고 문 헌

1. Meredith,S. and P. Finden, 'Production of Seamless Ti-6Al-4V Tubing', Titanium 95: Science and Technology, Proceedings of the 8th World Conference on Titanium, Edited by P.A.Blenkinship, W.J.Evans and H.M.Flower, The Institute of Materials, 1996, P. 755~762
2. Koch,M., H.Sibum, H.Jelenak and E. Plänker, 'Seamless Thin-walled TiAl6V4 Tubes Manufactured by Flow-Forming Process', Titanium92: Science and Technology Ed. by F.H.Froes and I.Caplan, The Minerals, Metals & Materials Society, 1993, P. 1429~1436
3. Kollmorgen,L.L., 'Titanium Tube Bending (Technical Paper NO.616)', American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Collected Papers, Metal Forming, Book4, Library Ed., The Boeing Company, Seattle, 1964, Vol. 64
4. Metals Handbook, 9th Ed. Vol. 14, April 1988, ASM International.
5. Materials Properties Handbook : Titanium Alloys, Ed. By R. Boyer, G.Welsch & E.W.Collings, ASM International,1994, P. 605
6. 'MIL-STD-1627C(SH), Bending of Pipe or Tube for Ship Piping Systems', 30. September, 1994 Commander, Naval Sea Systems Command, SEA 03R42, 2531 Jefferson Davis Hwy, Arlington, VA 22242-5160 USA.
7. MS 33611, 'Tube Bend Radii', April.1983 ,Commander, Naval Air Systems Command, Hwy 547, Lakehurst, NJ 08733-5100 USA.
8. Avitzur,Betzalel, 'Handbook of Metal-Forming Processes', P475, 1983, John Wiley & Sons, Inc..
9. Hosford, W.F., 'Metal Forming : Mechanics and Metallurgy', P282, 1983, by Prentice-Hall Inc..
10. Tanaka,S., 'Numerical Simulation of Tube Forming', J. of JSTP Vol.39 no.453(1998-10) P. 1029~1033