

비틀림 진동감쇠기용 슬리브 스프링의 제조 공정 해석

A Process Analysis for Manufacturing the Sleeve Spring of the Torsional Vibration Damper

황범철¹, 배원병², 김철¹✉

Beom Cheol Hwang¹, Won Byong Bae² and Chul Kim¹✉

¹ 부산대학교 기계기술연구원 (Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National Univ.)

² 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구원 (School of Mechanical Engineering & RIMT, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: chulki@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2489

Manuscript received: 2009.7.31 / Revised: 2009.8.27 / Accepted: 2009.8.30

In diesel engines, it is inevitable that the torsional vibration is produced by the fluctuation of engine torque. Therefore, it is necessary to establish preventive measures to diminish the torsional vibration. The sleeve spring type damper is one of the preventive measures for reducing the torsional vibration. In this study, 2-roll bending process was proposed to manufacture sleeve spring; The program to calculate the initial radius including springback effect was developed and the FEA method to analyze elasto-plastic problem was verified through analysis of 90 degree bending process. The elasto-plastic analysis of 2-roll bending process was carried out by the FEA method verified to set a new criterion, and the new process design parameter(contact angle) in the 2-roll bending process was proposed.

Key Words: Sleeve Spring (슬리브 스프링), 2-Roll Bending Process (2 롤 벤딩 공정), Springback (탄성복원), Elasto-Plastic (탄소성), Contact Angle (접촉각)

1. 서론

디젤엔진은 크랭크기구를 가진 왕복기관으로 토크 변동에 의한 크랭크축의 비틀림 진동이 필연적으로 발생하는데, 이를 저감시키기 위하여 적절한 진동감쇠기를 설치하거나 연소행정을 최적화한다. 비틀림 진동감쇠기는 저속엔진의 경우에 점성 유체형식, 중속엔진에는 코일 스프링형식, 고속엔진에는 슬리브 스프링형식을 사용한다. Fig. 1에 슬리브 스프링형식 비틀림 진동감쇠기를 나타내었으며, Fig. 2에 슬리브 스프링 팩을 나타내었다. 슬리브 스프링형식 비틀림 진동감쇠기의 비틀림 특성을 결정하는 부품은 슬리브 스프링으로 김철 등¹은 슬리브 스프링의 스프링 상수식을 유도하여 감

쇠기의 비틀림 특성식을 유도하였으며, 유한요소 해석을 통하여 인너 스타와 아우터 스타의 안전성을 검토하였다.

슬리브 스프링과 같은 원형 관 단면을 성형하는 방법으로 롤 벤딩, 스텝 벤딩, 스트레치 벤딩 및 프레스 브레이크 벤딩 공정 등이 많이 사용된

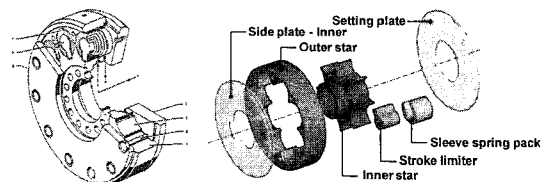
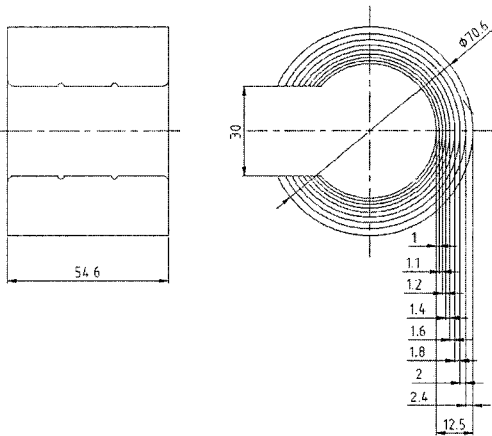


Fig. 1 The sleeve spring type-torsional vibration damper



(a) The sleeve spring pack



(b) Dimensions

Fig. 2 The sleeve spring pack used in MT881 Ka-500 Engine

다. 이중 롤 벤딩 공정은 다른 공정들에 비해 공정 설정 시간 단축, 롤 등의 공구 제조 비용 감소, 성형 후 직선부 길이 감소, 치수 정밀도 향상 및 우수한 원통도 등의 장점이 있기 때문에 원형 관 단면의 제품을 성형하는 데 널리 이용되고 있다. 3 롤 벤딩 공정²⁻⁵ 및 4 롤 벤딩 공정⁶⁻¹²에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나 2 롤 벤딩 공정에 대한 연구는 전무하다. 또한 롤 벤딩 공정은 판재의 물성에 따른 탄성복원량, 롤의 형상 및 배열, 판재와 롤 사이의 마찰 특성 등에 의해 영향을 받는 매우 복잡한 성형 메커니즘을 가지기 때문에 롤 벤딩 공정의 메커니즘에 대해 아직 완전히 규명되지 않은 실정이다.

이에 본 연구에서는 슬리브 스프링의 성형 공법에 대한 연구를 수행하고자 한다. 슬리브 스프링 제조 공법으로 3 롤 및 4 롤 벤딩 공정에 비해 간단한 공정으로 성형이 가능한 2 롤 벤딩 공정을 선정하였다. 판재 성형에서 탄성복원량 예측 이론^{13,14}을 사용하여 최종 제품의 직경으로 성형하기 위한 성형 반경을 결정하는 프로그램을 개발하고, 90 도 벤딩 공정에 대한 유한요소해석을 실시하여

해석 조건 및 기법의 타당성을 검토하였다. 또한 이를 바탕으로 하여 2 롤 벤딩 공정에 대한 유한요소해석을 수행하여 2 롤 벤딩 공정에서의 주요 공정 설계 변수에 대한 기준을 정립하고자 한다.

2. 판재 성형에서 탄성복원량 예측 및 성형 반경

2.1 탄성복원량 예측

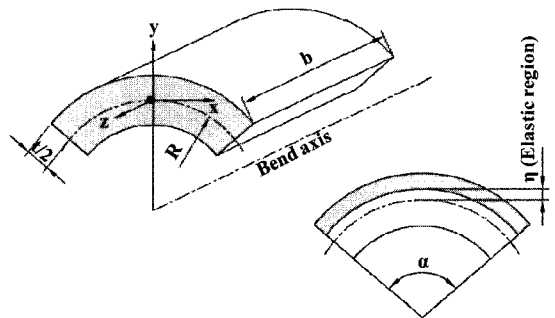


Fig. 3 Coordinate system and nomenclature in pure bending process

Fig. 3 에 순수 벤딩 공정에 대한 좌표계 및 기호를 나타내었다. 중립축에서 η 까지를 탄성영역이라고 하면 탄성영역에서는 일반화된 후크의 법칙이 성립하고, 이에 평면변형률 조건을 적용하면

$$\epsilon_x = \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_x = \frac{1}{E'} \sigma_x \quad (1)$$

이다. 또한, 변형률 정의에 의해서

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(R+y)\alpha - l_0}{l_0} \\ &= \frac{(R+y)\frac{l_0}{R} - l_0}{l_0} = \frac{y}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

이다.

판재의 중립면을 기준으로 하여 벤딩을 위해 필요한 모멘트는 σ_x 에 의해 발생하므로

$$M = 2 \times \int^{1/2} \sigma_f \cdot (b \times dy) \cdot y \quad (3)$$

3.1 해석조건의 타당성 검토

판재의 탄성복원을 고려한 유한요소해석 수행을 위한 해석 조건의 타당성을 검증하기 위하여 90도 벤딩 공정에 대해 DEFORM-2D ver. 9.1을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 이론식과 동일한 조건으로 검증하기 위하여 해석은 평면변형률 조건으로 하여 탄소성해석을 수행하였다. 해석 모델은 Fig. 4의 계산결과를 사용하였으며, Fig. 5에 유한요소해석을 위한 금형 구성을 나타내었다. 펀치, 홀더 및 다이는 강체로 가정하였으며, 소재의 요소 크기는 두께방향으로 요소가 6 개가 되도록 각 소재별로 두께를 고려하여 총 요소의 수를 결정하였다.

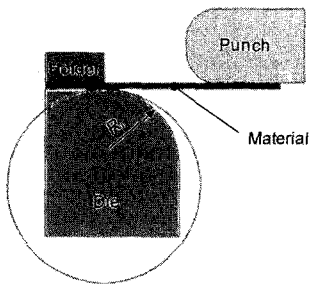


Fig. 5 Die modeling for bending process

Fig. 6에 해석 순서를 나타내었다. 먼저 펀치를 하강시켜 판재를 90도 굽히고, 벤딩 공정이 완료되면 펀치를 수평방향으로 이동시켜 판재의 탄성복원이 발생하도록 하였다.

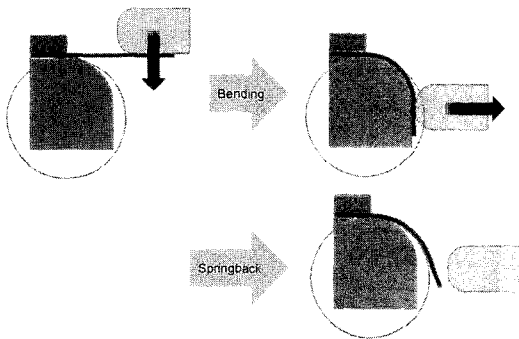
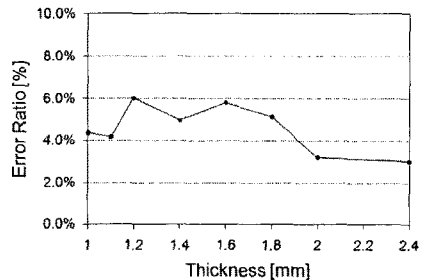


Fig. 6 Analysis procedures of 90° bending process

Table 1에 두께별 해석결과를 나타내었다. 해석 결과 설계값과의 오차가 3~6%로 잘 맞음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시된 해석 조건이 타당함을 알 수 있다.

Table 1 Comparison between the design values and the analysis values

Thick.	Radius		Error ratio (%)
	Design	Analysis	
2.4	32.9	33.9	3.0
2.0	30.9	31.9	3.2
1.8	29.1	30.6	5.2
1.6	27.5	29.1	5.8
1.4	26.1	27.4	5.0
1.2	24.9	26.4	6.0
1.1	23.8	24.8	4.2
1.0	22.8	23.8	4.4



3.2.2 롤 벤딩 공정 유한요소해석

Fig. 7에 2롤 벤딩 공정의 실제 시스템 및 해석을 위한 시스템 구성을 나타내었다. 실제 시스템에서는 벤딩 롤을 고정하고 우레탄 롤을 수직으로 상승시켜 판재를 굽힌 상태에서 우레탄 롤을 회전시킴으로써 연속적으로 판재를 유입함과 동시에 굽힘 공정을 수행한다. 따라서 우레탄 롤은 벤딩

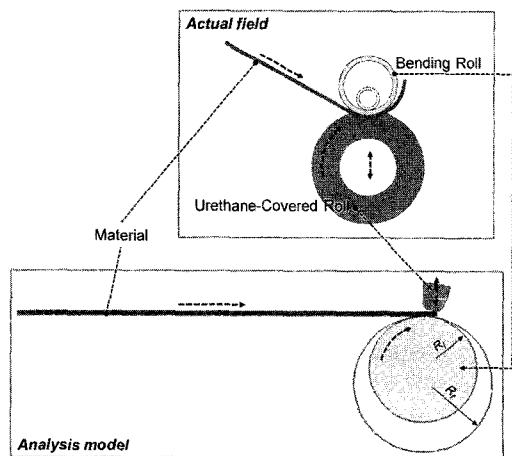


Fig. 7 The analysis model embodied from 2-roll bending process in actual field

공정 중에는 압축된 상태를 유지하게 되므로, 해석 시에는 원활한 해석 수행 및 해석 시간 단축을 위하여 우레탄 롤을 변형된 상태로 모델링을 하여 수직으로 이동시켰으며 벤딩 롤을 회전시켜 소재를 유입시켰다.

Fig. 8 에 2 롤 벤딩 공정에 대한 해석 순서를 나타내었다. 해석은 총 3 단계로 수행하였다. 1 단계는 우레탄 롤에 의해 소재를 벤딩시키는 단계이며, 2 단계는 벤딩 롤의 회전에 의해 소재를 유입시키는 단계이다. 2 단계에서는 벤딩 롤에 의해 소재가 유입되면서 우레탄 롤에 의해 벤딩되며 우레탄 롤과 접촉이 끝나면서 탄성회복이 발생하게 된다. 마지막 3 단계는 우레탄 롤을 원 위치로 이동 시킴으로써 소재에 작용하고 있는 하중을 제거하게 된다.

2 롤 벤딩 공정의 주요 공정 변수로는 판재 두께, 벤딩 롤의 직경 및 우레탄 롤의 압축량이 있으며, 판재 두께 및 벤딩 롤의 직경은 이론값에 의해 결정되므로 우레탄 롤의 압축량만 결정하면 된다. 따라서 우레탄 롤의 압축량을 결정하기 벤딩 롤과 판재의 접촉각에 따른 해석을 실시하였다. Fig. 9 에 벤딩 롤과 판재의 접촉각에 대한 정의를 나타내었다.

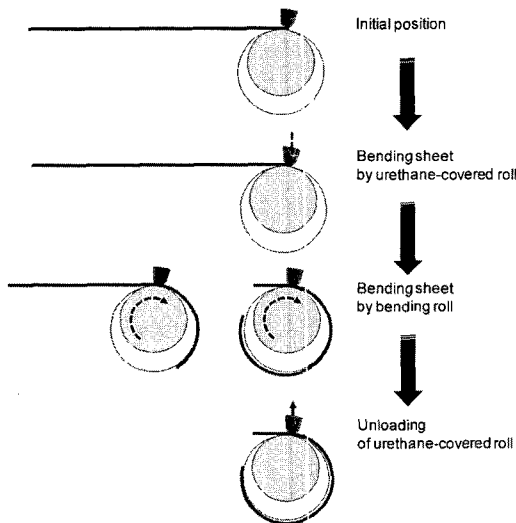


Fig. 8 Analysis procedures of 2-roll bending process

3.3 해석결과 및 고찰

Table 2 에 소재 두께 및 접촉각에 따른 해석결과를 나타내었으며, Table 3 에 설계값에 대한 오차

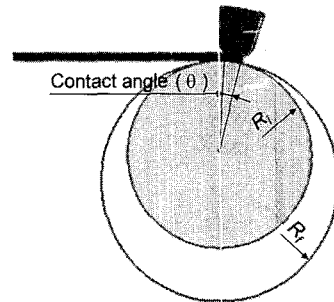


Fig. 9 Contact angle between bending roll and sheet

율을 나타내었다. Table 2 에서 접촉각이 감소함에 따라 탄성회복량이 증가하여 최종 제품의 직경이 커지는 경향을 나타내며, Table 3 에서 접촉각에 따른 오차율이 소재의 두께에 따라 다른 경향을 나타내므로 이론식에 의한 성형 관경을 그대로 적용할 수가 없다. 따라서 접촉각에 따른 오차율이 소재의 두께에 상관없이 유사한 경향 및 값을 나타낼 수 있도록 주요 공정 변수들간의 관계를 규정할 필요가 있다.

이에 Table 2 의 해석 결과를 『접촉각 / (소재두께 × 성형 직경)』에 대한 결과로 재정리하여 Table 4 에 나타내었다. Table 4 에서 『접촉각 / (소재두께 × 성형 직경)』에 대해 오차율은 소재의 두께에 상관없이 유사한 경향 및 값을 나타낼 수 있다. 따라서 2 롤 벤딩 공정에서 탄성회복량을 고려하여 제품을 성형 시에는 이론식에 의해 성형 직경을 구하여 『접촉각 / (소재두께 × 성형 직경)』이 일정한 값이 되도록 우레탄 롤과 판재의 접촉각을 결정하여야 한다. 본 연구에서 적용된 스프링 강의 경우 설계값에 대한 오차율을 판재의 두께에 상관없이 -5% ~ +5% 수준으로 유지하기 위해서는 『접촉각 / (소재두께 × 성형 직경)』이 0.1 ~ 0.15 가 되도록 하면 된다.

Fig. 4 에서 구성된 성형 반경 계산 프로그램에 우레탄 롤과 판재의 접촉각을 계산하는 화면을 추가하여 프로그램을 최종 프로그램을 구성하였으며 『접촉각 / (소재두께 × 성형 직경)』의 값은 사용자가 임의로 입력할 수 있도록 하였다. 따라서 최종 프로그램에서는 Fig. 4 의 『Calculation』 버튼을 클릭하면 슬리브 스프링 팩의 각 두께별 성형 반경과 소재 두께별로 접촉각을 자동으로 계산할 수 있다. Fig. 10 에 최종 프로그램의 구성을 나타내었다.

Table 2 Analysis results of 2-roll bending process

Contact Angle [°]	Thickness [mm]						
	2.4	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
10	31.43	28.80					
9	31.96	28.90	27.27				
8	33.58	29.10	27.67	25.78			
7	33.62	30.05	27.79	25.88	24.24		
6	35.69	30.69	28.43	26.13	24.54	23.40	
5	41.04	32.96	30.05	27.00	24.72	23.69	
4				28.08	25.08	23.61	21.79
3					26.81	24.35	21.90
2						25.10	22.44
1							22.80
0.5							23.18

Table 3 Error ratios of analysis values to design values

Contact Angle [°]	Thickness [mm]						
	2.4	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
Design value (R_i)	32.9	30.9	29.1	27.5	26.1	24.9	22.8
10	-4.47%	-6.80%					
9	-2.86%	-6.47%	-6.29%				
8	2.07%	-5.83%	-4.91%	-6.25%			
7	2.19%	-2.75%	-4.50%	-5.89%	-7.13%		
6	6.57%	-0.68%	-2.30%	-4.98%	-5.98%	-6.02%	
5	24.74%	6.67%	3.26%	-1.82%	-5.29%	-4.86%	
4				2.11%	-3.91%	-5.18%	-4.43%
3					2.72%	-2.21%	-3.95%
2						0.80%	-1.58%
1							0.00%
0.5							1.67%

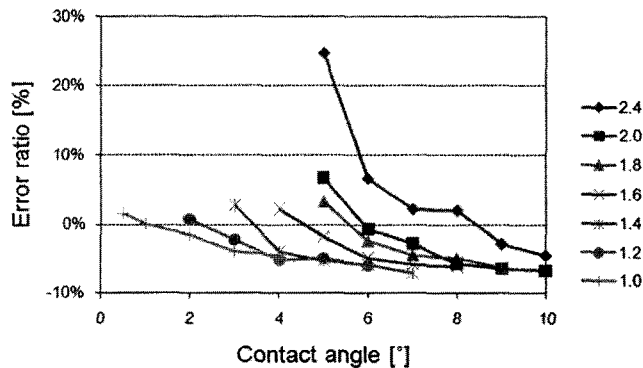
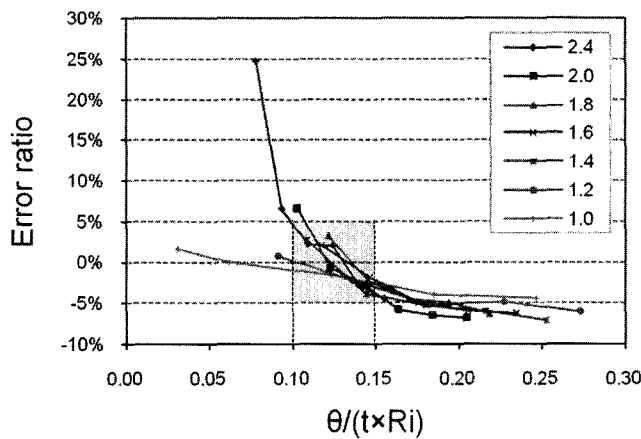


Table 4 $\theta / (t \times R_i)$ converted from contact angle

Contact Angle [°]	Thickness [mm]						
	2.4	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
10	0.155	0.205					
9	0.140	0.184	0.218				
8	0.124	0.164	0.194	0.235			
7	0.109	0.143	0.170	0.205	0.253		
6	0.093	0.123	0.146	0.176	0.217	0.273	
5	0.078	0.102	0.123	0.147	0.180	0.227	
4				0.117	0.144	0.182	0.247
3					0.108	0.136	0.185
2						0.091	0.123
1							0.062
0.5							0.031



4. 결론

본 연구에서는 슬리브 스프링형식 비틀림 진동 감쇠기의 주용 부품인 슬리브 스프링의 성형 공법을 제안하고 주요 공정 변수에 대한 설계 기준을 정립하기 위하여 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 판재 성형에서의 탄성복원 예측 이론을 슬리브 스프링 형상에 적용하여 성형 반경을 계산할 수 있는 프로그램을 개발했다.
- (2) 탄성복원을 고려한 유한요소해석 기법의

타당성을 검증하기 위해 90° 벤딩 공정에 대한 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 해석 결과 이론식과의 오차가 3 ~ 6%로 잘 일치하였다.

- (3) 2 롤 벤딩 공정에 대한 유한요소해석 방안을 제시하였다.
- (4) 2 롤 벤딩 공정에 대한 유한요소해석 결과를 토대로 접촉각에 따른 오차율이 소재의 두께에 상관없이 유사한 경향 및 값을 가지도록 공정 변수 설계 기준으로 『접촉각 / (소재두께 × 성형 직경)』을 제시하였다.

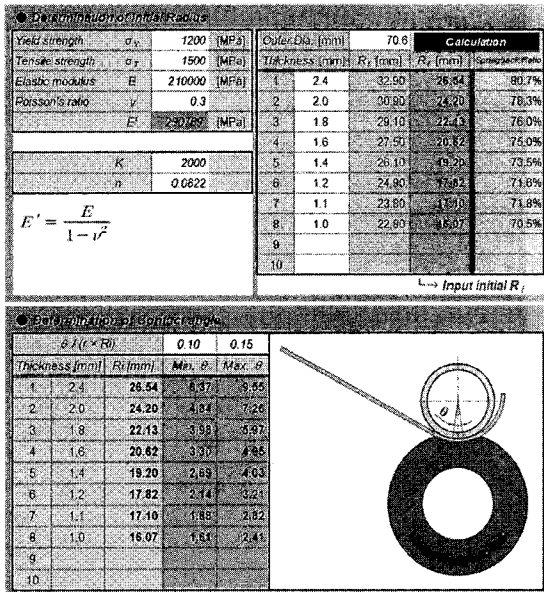


Fig. 10 Excel-VBA program to calculate initial radius and contact angle between the bending roll and the sheet

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Hwang, B. C., Kim, C. and Bae, W. B., "A Study of Structural Analysis and Torsional Characteristic of the Sleeve Spring Type-Torsional Vibration Damper," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 94-100, 2009.
- Yang, M. and Shima, S., "Simulation of Pyramid Type Three-roll Bending Process," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 30, No. 12, pp. 877-886, 1988.
- Yang, G., Mori, K. I. and Osakada, K., "Determination of Forming Path in Three-Roll Bending Using FEM Simulation and Fuzzy Reasoning," Journal of Material Processing Technology, Vol. 45, No. 1-4, pp. 161-166, 1994.
- Hu, W. and Wang, Z. R., "Theoretical Analysis and Experimental Study to Support the Development of a More Valuable Roll-bending Process," International

- Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 5, pp. 731-747, 2001.
- Zeng, J., Liu, Z. and Champliaud, H., "FEM Dynamic Simulation and Analysis of the Roll-Bending Process for Forming a Conical Tube," Journal of Material Processing Technology, Vol. 198, No. 1-3, pp. 330-343, 2008.
- Hua, M., Sansome, D. H., Rao, K. P. and Baines, K., "Continuous Four-roll Plate Bending Process: Its Bending Mechanism and Influential Parameters," Journal of Material Processing Technology, Vol. 45, No. 1-4, pp. 181-186, 1994.
- Hua, M., Baines, K. and Cole, I. M., "Bending Mechanisms, Experimental Techniques and Preliminary Tests for the Continuous Four-Roll Plate Bending Process," Journal of Material Processing Technology, Vol. 48, No. 1, pp. 159-172, 1995.
- Hua, M., Cole, I. M., Baines, K. and Rao, K. P., "A Formulation for Determining the Single-pass Mechanics of the Continuous Four-roll Thin Plate Bending Process," Journal of Material Processing Technology, Vol. 67, No. 1, pp. 189-194, 1997.
- Hua, M. and Lin, Y. H., "Large Deflection Analysis of Elastoplastic Plate in Steady Continuous Four-Roll Bending Process," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, No. 12, pp. 1461-1483, 1999.
- Hua, M. and Lin, Y. H., "Effect of strain hardening on the Continuous Four-roll Plate Edge Bending Process," Journal of Material Processing Technology, Vol. 89-90, pp. 12-18, 1999.
- Lin, Y. H. and Hua, M., "Influence of Strain Hardening on Continuous Plate Roll-bending Process," International Journal of Non-linear Mechanics, Vol. 35, No. 5, pp. 883-896, 2000.
- Hua, M., Baines, K. and Cole, I. M., "Continuous Four-Roll Plate Bending: a Production Process for the Manufacture of Single Seamed Tubes of Large and Medium Diameters," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 39, No. 6, pp. 905-935, 1999.
- Lange, K., "Handbook of Metal Forming," McGraw-Hill, pp. 19.3-19.7, 1985.
- Mielnik, E. M., "Metalworking Science Engineering," McGraw-Hill, pp. 731-734, 1991.