

## 냉간 압연기용 롤의 배열이 마멸에 미치는 영향 The Effect of Roll Arrangement in the Cold Rolling Mill on the Wear

손 영 지(동아대 대학원) · 김 순 경(동의공업대) · 전 언 찬(동아대)  
Young-Ji Son · Soon-Kyung Kim · Eon-Chan Jeon

### ABSTRACT

Work roll wear in the cold rolling of mild steel strip is strongly affected by rolling materials, rolling conditions such as roll arrangement in the cold rolling mill and lubrication. The tests were performed to find the effects of roll arrangement in the cold rolling mill on the work roll wear under the same lubricating conditions. The obtained results are as follows :

If the distance of cold rolling is about 60 km, the surface roughness of its was reduced by half( $R_a$  0.49 $\mu$ m) and Pc(peak count) also was decreased to 60 ea/cm.

It is easier for CC(Continuous casting) to make a slip on rolling than IC(Ingot casting). It is due to surface mirror in which first residual product appears and iron powder included  $Al_2O_3$  is stuck.

Because bending degree of 4Hi-rolling mill is higher than 6Hi-rolling mill, the first surface mirror was occurred to its center-point which is loaded strongly.

6Hi-rolling mill shape-controlled by intermediate roll doesn't need the initial crown to work roll. Therefore, fatigue and wear would appear a little bit.

### 1. 서 론

냉간 압연 장치는 1747년 영국에서 최초로 개발되었으며, 실제 가역압연 작업이 가능한 설비는 1920년 독일에서 개발하였으나, 이때까지는 모두가 2단 설비였으며, 현재 널리 사용되는 4단 가역과 6단 가역 방법을 사용하는 압연기는 1932년 이후에 독일과 일본 등지에서 개발하여 성능을 향상시켜왔다.

그러나, 다단 압연기인 탠덤(tandem)형식의 냉간 압연기는 1904년 미국의 West Leechburg Steel Company에 2단 4스탠드로 설치되었다.

그 후 1930년대부터는 급속한 발전을 거듭하여 지금은 대부분 4단 혹은 6단 5스탠

드가 주종을 이루고 있다. 지금은 냉간압연 설비의 각종 제어장치가 급속히 발달되어 압연두께 및 형상을 자동두께와 형상제어 장치가 개발되어 이 장치에 의하여 자동으로 제어를 하고 있다. 특히 작업 롤의 마멸이 압연기의 롤 배열에 따라 다르며 특히 판의 가장자리가 통과하는 양쪽 끝 부분에 많은 손상이 발생되어 품질과 생산성이 저하되고 있다.

표면처리 강판의 수요가 급격히 증가하고 있어 판면 조도관리의 정밀도가 점차 문제로 대두되고 있으나, 이 분야에 관한 연구 결과가 거의 없는 실정이다.

이와 같이 롤 배열의 변화에 따른 문제점과 작업롤의 마멸 등에 대하여 실제 생산중인 장치에서 실험을 하고자 한다.

## 2. 작업롤의 마멸

압연기용 롤의 표면 거칠기가 클수록 압연속도의 증가에 따른 압연유의 유입량이 많게되어 일정한 포화상태가 유지되며, 롤 표면의 거칠기에 따라 마찰력도 변하게 된다. 따라서 표면 거칠기가 큰 작업롤과 보강롤은 롤 표면에 가공된 산의 마멸이 빠르게 진행된다. 경계 윤활 상태에서는 롤 마멸이 빠르게 일어나 압연 가공에서 슬립현상이 발생되므로 압연가공이 불안정하게 된다. 그리고 접촉호 내에서의 롤 마멸은 판면 거칠기도 관계되므로 매우 복잡하다.

Fig. 1은 접촉하는 롤의 바이트를 나타낸 것으로 판면의 경계윤활에 의한 전단응력이 발생하는 부분과 유체윤활이 이루어지는 구역이 공존하게 된다.

실제 계산에는 근사식

$$\alpha_c = \exp\left(-1.794 \frac{h_c}{\sigma_c}\right) \quad (1)$$

을 사용하고 있다. 이 경우에 마찰전단응력  $\tau$ 는

$$\tau = \alpha_c \tau_b + (1 - \alpha_c) \tau_f \quad (2)$$

으로 나타낸다.<sup>26)</sup> 여기서  $\tau_b$ 는 경계 윤활 영역의 전단응력,  $\tau_f$ 는 유체 윤활 영역에서의 전단응력을 말한다.

Fig. 1은 냉연강판과 작업롤이 서로 접촉하여 소성가공이 이루어지고 있는 작업롤 바이트를 나타낸 것으로 이 부분에서의 윤활은 냉연강판의 판 면과 작업롤 사이에서 압연유에 의한 윤활이 전혀 이루어지지 않는 경계윤활에 의한 전단응력이 발생하는 부분과 작업롤과 냉연강판 사이에 압연유가 유막을 형성하고 있는 유체윤활 구역이 동시에 존재하는 혼합윤활 구역이다.

A부분은 중립점으로서 작업롤과 판의 속도가 동일하여 슬립발생이 없으나 중립점을 경계로 입구측에서는  $V_1 < V$  이 되며 출구측에서는  $V_2 > V$ 가 된다.

따라서 중립점을 제외한 부분에서는 속도차가 발생하게 되며 이 속도차에 의하여 마멸작용이 발생하여 철 분말이 생성된다.

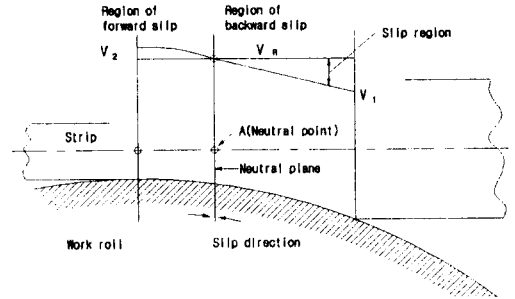


Fig. 1 Schematic diagram of roll bite

## 3. 실험장치 및 방법

### 1) 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 냉간 압연가공에 많이 사용되는 SHP-1 (SAE1008)이며 화학적 성분은 Table 1과 같다. 두께는 2.75mm, 폭은 1219mm 인 열연강판을 열간 압연시 판 표면에 생성된 스케일을 산세공정에서 제거한 후, 본 실험에 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions of specimen (wt. %)

Composition	C	Si	Mn	P	S
SAE1008	0.05	0.009	0.25	0.010	0.010

Table 2 Mechanical properties of specimen

		Hardness (HRB)	Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SAE 1008	IC	53	246	357	42
	CC	57	245	377	40

### 2) 실험장치

본 실험에 사용된 냉간 압연기는 Fig. 2와 같이 실제 냉간 압연 제품을 생산하는 실제 생산용 압연기로서 4 단 가역압연기의 압하용 유압 실린더가 보강롤 지지부의 하

부에 위치하고 있으며 압하력은 1,400 톤 이하에서 압연가공을 행하였고, 판두께는 자동두께 제어장치(Automatic gage control system)를 사용하였다.

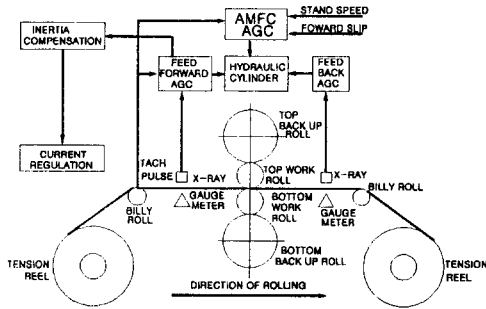


Fig. 2 Diagram of cold rolling mill

압연 가공조건은 Table 3과 같고, 압연유의 조건은 Table 4와 같이 두었다.

Table 3 Cold rolling conditions

Mill type	4 Hi & 6Hi reversing mill
Line speed	800 m/min. (max.)
Work roll dia.	450 (mm)
Back up roll dia.	1,360 (mm)
Separating force	1,300 Ton
Gauge control	Automatic gauge control system
Flatness control	Automatic flatness control system

Table 4 Compositions of lubricant

Compositions (wt.%)	Tallow (base)	90.5
	Fatty acid	2.5
	Lubricity additives	2.0
	Antioxidants	1.0
	etc.	4.0

### 3) 실험방법

압연기의 롤 표면의 거칠기와 마멸량은

롤을 연삭 가공하고 거칠기 가공을 한 후 거칠기와 직경을 측정하고 압연가공을 한 후 작업물을 교환하면서 마멸량을 확인한다. 측정은 롤 몸통의 중앙에서 실시하였으며, 슬립이 발생 될 때까지 사용한 후 작업물 조도를 측정하고 표면상태를 확인하기 위하여 SEM촬영을 실시하였다. 판면의 상태를 확인 비교하기 위하여 SEM촬영을 실시하여 마멸현상과 조도저하의 관계를 비교하였다. 마멸량 측정은 롤 직경 측정용 마이크로메타와 다이얼 게이지를 사용하였으며, 조도측정은 평면 측정용 조도계를 사용하였고 Ra 값으로 표기하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

작업물 표면조도의 변화는 작업물의 마멸을 의미하므로 작업물 표면의 조도감소가 빠르면 재연삭과 조도가공회수도 많게 되어 품질을 저하시키고 가공비도 많이 들게 되므로 조도가공이 매우 중요하다. 냉간압연 가공 전과 후의 작업물 표면조도를 작업물 몸통길이의 1/4 되는 지점에서 측정한 값이 Fig. 3과 같이 나타났다. 냉간 압연 가공 전 작업물의 표면조도는 Shot blast 조도 가공을 한 것이기 때문에 불균일 하지만 작업물 표면에 산의 수가 많고, 60km 정도 냉간 압연 가공후의 작업물 표면의 산이 철판과의 마찰에 의하여 거의 다 마멸되고 산의 형태를 찾을 수 없고 연삭가공시의 조도 Ra 0.6  $\mu\text{m}$  보다 낮은 Ra 0.49  $\mu\text{m}$ 이하로 되어 거의 평면화 되었음을 알 수 있다. 산의 수도 조도와 마찬가지로 작업물의 조도가공시는 Pc 107 ea/cm로 산의 수가 많지만 냉간 압연 가공 후에는 Pc 60 ea/cm로 감소되어 슬립발생의 가능성이 높게되고 냉연강판 표면의 조도가공이 불가능하게 된다. 일반적으로 냉간 압연가공의 경우는 작업물의 표면 조도가 Ra 0.6  $\mu\text{m}$  이하가 되면 롤 사고의 위험성이 있으므로 이 보다 높은 조도에서 작업물을 교체하는 경우가 많다.

롤 표면에 새로운 형태의 조도를 형성하게 되며, 소성가공을 위하여 가하는 압하력이 클수록 마멸량이 증가하게 된다. 상단부에도 하단부와 같이 응력 분포곡선이 집중적으로 분포되어 있는 것은 유압실린더로부터 압하력을 작업롤로 전달시켜 주기 위하여 보강롤과 선접촉을 하는 지점으로 상대속도가 같기 때문에 롤 바이트보다는 마멸량이 적지만 여기서도 집중적으로 하중을 받아 마멸이 발생됨을 알 수 있다.

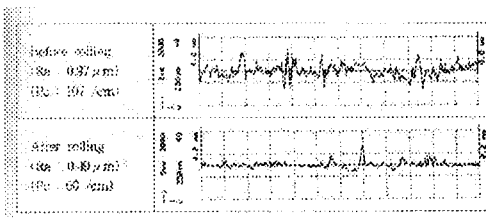


Fig. 3 Surface roughness and peak count of work roll in the cold rolling (length : 60km)

작업롤 표면의 거칠기 가공은 쇼트 블라스트법이 사용되었다. Fig. 4에서 보는바와 같이 작업롤 표면조도는 IC재의 경우 작업롤 표면조도가 비교적 보존 유지되지만 마멸량은 많고, 연주재는 반대로 작업롤의 표면조도가 철 분말의 표면 응착현상으로 조기에 경면화 현상을 나타내어 슬립발생가능성이 높게됨을 알 수 있으나 롤 마모량은 IC재 가공시보다 적음을 알 수 있다.

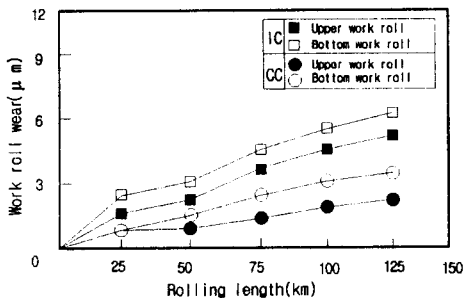


Fig. 4 Relationship between work roll wear and rolling length

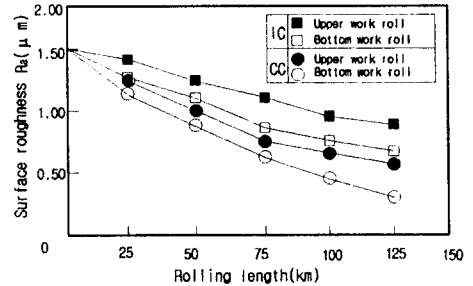
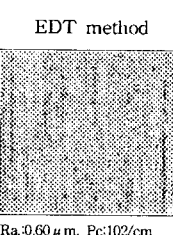
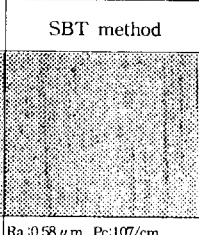
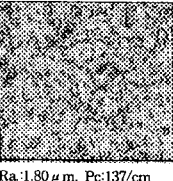
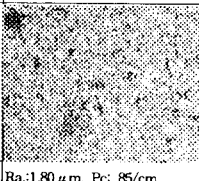
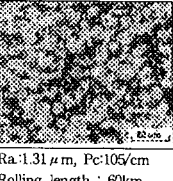
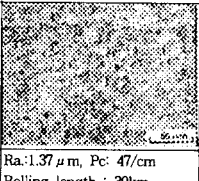


Fig. 5 Relationship between work roll roughness and rolling length of strip

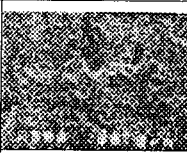

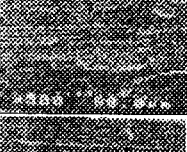
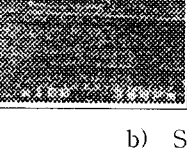
고부하 압연에서는 롤 양단의 압력이 중앙보다 크게되어 롤의 국부적인 마멸 현상이 발생되었으나, Fig. 4와 Fig. 5는 작업롤 몸체의 1/4되는 지점에서 측정된 값이다. Fig. 4에서는 IC재인 경우는 거의 직선적으로 마멸이 일어나지만 연주재는 75km부터는 마멸이 거의 되지 않음을 알 수 있고, Fig. 5에서는 연주재의 조도저하가 빠름을 알 수 있다. 압연 가공 재료별로 보면 하롤은 마멸량이 크고 조도 저하도 크게됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 압연유 분사 방법에 기인하는 것으로 하롤은 접촉호 내에서 충분한 압연유 포켓을 형성하지 못하기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 6에서는 작업롤의 표면과 판면상태를 SEM으로 촬영하고 상관관계를 비교하였으며, 판면의 균열상태와 작업롤 바이트 상에서의 산부분 마멸이 발생하는 양상을 확인하였으며 중립점 전과 후에서 미세한 슬립이 발생되었음을 알 수 있다. 공식(2)에서 알 수 있듯이 판과 롤 표면에 존재하는 산이 예리하고 많을수록 경계 윤활부분이 많으며, 이 부분이 클수록 판표면에 전단력이 많이 발생되어 철 분말이 판면에 많이 잔존하게 되고 롤 표면은 경면화 된다. 실제 냉간 압연 가공시에는 경계 윤활 부분과 유체 윤활부분이 명확하게 구분되지

않는다.

	EDT method	SBT method
Before texturing (grinding stone: #80)		
	Ra:0.60 μm, Pc:102/cm	Ra:0.58 μm, Pc:107/cm
After texturing		
	Ra:1.80 μm, Pc:137/cm	Ra:1.80 μm, Pc: 85/cm
After rolling		
	Ra:1.31 μm, Pc:105/cm Rolling length : 60km	Ra:1.37 μm, Pc: 47/cm Rolling length : 30km

a) Work roll

Hot coil		Hot coil thickness : 2.0mm Work roll surface roughness : Ra. 0.7 μm Strip surface roughness : Ra. 1.40 μm
1pass		Hot coil thickness: 1.48mm Reduction ratio : 26% Line speed : 300m/min Strip surface roughness : Ra. 0.71 μm
3pass		Hot coil thickness: 0.83mm Reduction ratio : 26% Line speed : 600m/min Strip surface roughness : Ra. 0.45 μm
5pass		Hot coil thickness: 0.47mm Reduction ratio : 26% Line speed : 600m/min Strip surface roughness : Ra. 0.45 μm

b) Strip

Fig. 6 SEM of Work roll and strip surface

Fig. 7은 냉간 압연 가공용 압연기의 롤 단수에 따른 롤 배열도로서 4단과 6단을 나타낸 것이다. 4단 압연기는 압연강판의 형상 개선을 위하여 작업롤 가공시 초기에 크라운을 주지만 6단인 경우는 크라운을 주지 않아도 중간롤이 보강을 해준다.

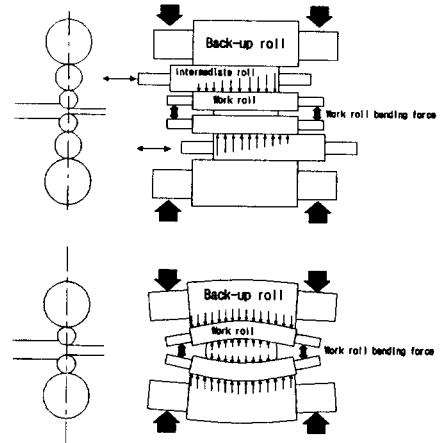


Fig. 7 Diagram roll arrangement of mill

Fig. 7에서 4단 압연기는 보강롤의 베어링부분에 집중적으로 가해지는 힘에 의하여 작업롤의 몸통이 굽혀져 강판의 단면은 항상 중앙부분이 두껍게 나타났다. 이와 같은 현상을 감소시키기 위하여 작업롤의 베어링 지지부분에 역방향으로 힘을 가하지만, 롤의 배열상 다소 감소는 가능하나 해결은 불가능하다. 그러나 6단 압연기는 중간 롤이 강판의 폭에 따라 움직이면서 보강을 하므로 4단 압연기와 같은 현상이 발생되지 않아 롤이 굽혀지면서 집중적으로 힘을 받지 않는다. 따라서 6단 압연기의 롤은 4단 압연기보다 하중은 많이 받으면서 롤의 마멸이 균일하게 된다.

Fig. 8은 4단과 6단 압연기의 작업롤이 받는 부분적인 피로현상이나 스폴링현상,

그리고 경면화 현상을 나타낸 것이다. 여기서 4단 압연기는 강관의 가장자리가 지나가는 부분에서 많은 손상을 입고 중앙부분에 경면화가 발생되나 6단 압연기의 경우는 유사한 현상이 발생되어도 그것의 정도가 매우 미미하였다.

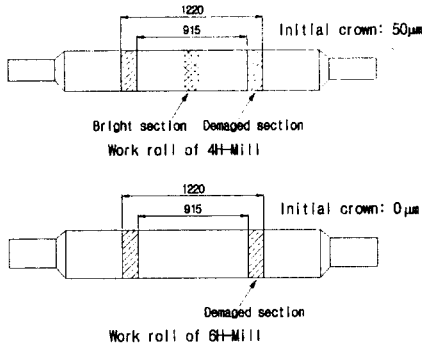


Fig. 8 Comparison of work roll surface on the roll arrangement

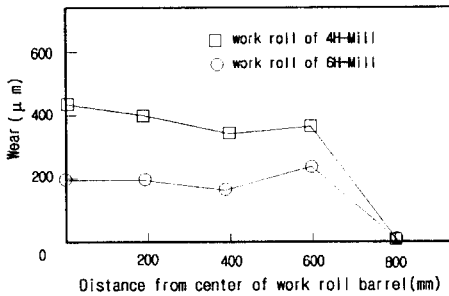


Fig. 9 Comparison of wear for the 4Hi-mill and 6Hi-mill

Fig. 9는 4단과 6단 압연기의 작업물의 마멸량을 부위별로 측정하여 나타낸 것이다. 4단 압연기의 작업물의 경우는 롤의 마멸량이 중앙부분과 강관의 가장자리가 지나가는 부분에서 마멸이 크게 일어남을 알 수 있고, 6단 압연기의 경우는 4단 압연기에 비해 전반적으로 일정하게 발생하는 경향을

나타냄을 알 수 있다.

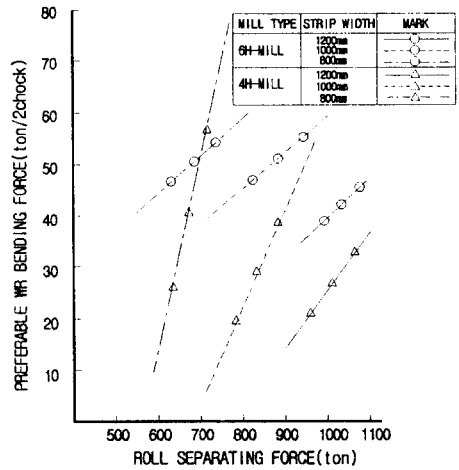


Fig. 10 Relationship between roll separating force and preferable work roll bending force

Fig. 10은 압연에 필요한 압하력의 변화에 대한 강관의 형상개선을 위한 작업물의 굽힘에 대한 효과를 나타낸 것으로, 4단 압연기의 경우 압하력의 증가에 대한 작업물의 굽힘력의 변화가 급격하게 증가되어 롤의 크라운 제어가 어렵다. 그러나 6단 압연기의 경우는 압하력의 변화에 대한 롤의 굽힘력이 매우 안정적이므로 압연가공에서 강관의 형상제어가 매우 용이하고 마멸도 균일하게 발생되어 롤 표면의 피로현상도 적게 발생되므로 연삭 가공량이 감소될 뿐만 아니라 롤의 수명과 생산량이 증가하게 된다.

동일한 압하력이 작용할 경우 강관의 폭이 클수록 롤 굽힘값이 작게 나타나고 있다. 소폭일 경우 대폭에 비하여 롤 굽힘에 많은 힘이 필요한 힘이 많이 소요되는 현상은 4단 압연기와 6단 압연기에서 동일한 현상으로 나타났다. 이와 같은 현상으로 인하여 소폭의 경우 4단 압연가공 후에 두께를

측정해보면 강관의 두께에 따라 다소 차이는 있으나 20~25 $\mu\text{m}$  정도 중앙이 두껍게 나타난다. 그러나 6단 압연기의 경우는 4단 압연기의 60%수준이므로 폭 방향의 두께편차가 현저하게 감소되어 형상과 두께의 품질이 향상되는 효과가 있다.

## 5. 결 론

냉간 압연 가공시 작업롤 마멸과 슬립은 재질, 압연조건, 그리고 압연유 등 세반 부하조건에 따라서 크게 변하지만 본 실험에서는 작업롤의 마멸현상을 IC재와 연주재를 비교하고 롤의 배열에 따른 마멸현상을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 작업롤의 표면 거칠기는 압연가공 거리가 60km 정도일 때, 평균 거칠기는 1/2정도 감소되어 Ra 0.49 $\mu\text{m}$ 로 되고, 산의 수는 Pc 60 ea/cm로 감소되었다.

2) IC재보다 연주재는 롤 표면에 산화 알루미늄을 포함한 철 분말의 응착으로 인한 표면의 경면화가 조기에 발생하여 압연가공시 슬립이 발생되기 쉽다.

3) 4단 압연기는 6단 압연기보다 롤의 굽힘 정도가 크기 때문에 작업롤의 중앙부분에 집중적인 하중을 받아 마멸에 의한 조기 경면화가 발생된다.

4) 6단 압연기는 중간롤에 의한 형상제어가 이루어지므로 작업롤에 초기 크라운이 필요 없으므로 피로현상과 마멸이 적게 발생된다.

## 참 고 문 헌

1. P. Ratte and J. T. Bouteille ; Proc. of int. conf. on steel rolling P. 885 (1980)
2. 柳島章也, 藤原俊二, 北村邦雄, 安田顯 ; 鐵 鋼, 第13號, P.1204 (1982)
3. 神馬照正, 藤秀一, 岡見雄二 ; 潤滑, 第 8號, P. 17 (1982)

4. 北村邦雄, 安田 顯, 角山浩三, 柳島章也 ; 鐵 鋼, 第13號, P 1202 (1982)
5. 藤秀一, 園田 榮 ; 鐵 鋼, 第11號, P. 103 (1989)
6. 原木鎭二, 萬羽昭夫 ; 鐵 鋼, 第 3號, P. 126 (1987)
7. 待貫 輝, 川 高雄 ; 塑性 加工, 第 3號, P. 990 (1982)
8. 神馬照正, 藤秀一, 園田 榮, 山本 昇, 青林智幸 ; 鐵 鋼, 第 5號, P. 377 (1983)
9. 福山 敏, 御園生一長 ; Journal of the JSTP, 第25號, P. 899 (1984)
10. 春日保男, 山日勝康, 加藤勝人 ; 日本機械學會 論文集, 第33號, P. 1294 (1967)
11. 工藤英明 ; 塑性 加工, 第13號, P. 529 (1972)
12. 大貫 輝, 川 高雄 ; 塑性 加工, 第23號, P. 991 (1982)
13. P. Ratte and J. T. Bouteille ; Proc. of int. conf. on steel rolling P. 885 (1980)
14. T.Okamoto, T.Jinba. H.Kuwamoto, & S.Iwadoh ; Proc. of int. conf. on steel rolling P. 668 (1980)
15. A. Akira : ISIJ, P. 1769 (1992)
16. K. Kitamura, K. Masanori, Y. Ikuo ; 潤滑, 第28號, P 644 (1992)