

< 기술논문 >

롤 크리너 선압의 해석 및 측정기술

최종근[†] · 최현철^{*} · 이응기^{**}

(2006년 4월 17일 접수, 2006년 7월 13일 심사완료)

Analysis and Measurement of the Nip Pressure of Roll Cleaner

Jong-Guen Choi, Hyeon-Cheol Choi and Eung-Ki Lee

Key Words: Roller(롤러), Roll Cleaner(롤 크리너), Nip Pressure(선압), Nip Pressure Measurement(선압측정)

Abstract

In the rolling mills for sheet metal rolling, paper rolling and etc., the impurities of roller surface have crucial effects on the surface quality of the products obtained by rolling. The Roll Cleaner is a device to remove impurities on roller surface during a rolling operation. Nip Pressure means the line pressure interacted between the roll cleaner blade and the roller surface. The nip pressure is the most important parameter which decides the performance of roll cleaner, and it depends upon several factors including the cleaner design and its blade stiffness. This study, first, analyzes the mechanism of the nip pressure generation for a roll cleaner designed commercially, which is an crucial process for effective design of roll cleaners. Second, the technique for the measurement of nip pressure is developed, which is useful to verify the performance of roll cleaners and to setup them properly at factory floor.

1. 서 론

압연공정은 중요한 소성가공의 하나로 시중에 판매되는 관재, 봉재, 단면재 등의 생산에 널리 적용되고 있다.⁽¹⁾ 압연공정에서 압연롤러의 표면에 이물질이 발생하면 제품 표면에 손상을 입히게 되어 제품의 품질 저하와 불량률 상승을 초래한다.⁽²⁾ 지금까지 압연롤러에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나 압연롤러의 이물질 제거에 관한 연구는 발표된 바 없다. 롤 크리너(roll cleaner)는 롤러표면에 발생된 이물질을 제거하는 장치로서 대부분의 현장에서 필수적으로 사용되고 있으며, 독일의 Joe Clouth사와 일본의 ABC Blade사가

생산 및 판매에 있어 세계적으로 독과점을 형성하고 있다. 근래 국내 S사가 이들의 특허권을 피한 새로운 방식의 제품을 출시하여 국내 및 세계 시장에서의 경쟁력 확보를 위한 노력이 진행되고 있다.

롤 크리너의 핵심기술로는 롤 크리너의 블레이드와 롤러 표면 사이에 작용하는 압력을 의미하는 선압(nip pressure)을 블레이드 전체 길이에 걸쳐 원하는 크기로 균일하게 유지하는 것이며, 이는 롤 크리너의 성능을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 선압에 영향을 주는 대표적인 설계인자는 선압발생기구, 본체의 형상 및 치수, 블레이드 재질 등이며, 우수한 롤 크리너의 설계를 위해서는 이들에 대한 정확한 계산과 검증이 필요하다. 특히, 고정밀의 대형 롤 크리너의 개발을 위해서는 사용환경에 따른 선압을 측정하고 이를 조절할 수 있는 방안이 요구된다. 본 연구는 S사의 롤 크리너를 기반으로 선압발생기구를 해석함으

[†] 책임저자, 회원, 순천대학교 기계우주항공공학부

E-mail : jgchoi@sunchon.ac.kr

TEL : (061)750-3823 FAX : (061)750-3820

^{*} 순천대학교 기계우주항공공학부 대학원

^{**} 회원, 공주대학교 기계·자동차공학부

로써 균일 선압을 위한 설계인자를 규명하고, 제작된 롤 크리너의 검사와 설치에 활용할 수 있는 선압의 정밀측정 방법을 개발하는데 그 목적을 두었다.

2. 본 론

2.1 롤 크리너의 구조와 동작원리

Fig. 1은 본 연구에서 해석 목표가 된 S사의 롤 크리너를 보여준다. 선압발생기구를 살펴보면, 먼저 사용자가 조정핸들(adjustment handle)로 토크 전달축(torque shaft)을 회전시키면, 토오크 전달축 양단의 토션스프링(torsion spring)에 의해 토오크가 축하우징(shaft housing)에 전달된다. 다음으로 축하우징의 회전은 블레이드 홀더(blade holder)에 의해 고정된 블레이드의 회전운동으로 전달되고, 블레이드의 회전은 롤러표면과의 접촉으로 저지된다. 추가되는 조정핸들 회전은 블레이드의 회전 대신 토션스프링의 비틀림을 통하여 블레이드와 롤러사이의 선압을 발생시킨다. 이때, 블레이드 선단에서 발생하는 선압의 크기는 토션스프링에 의해 블레이드에 전달되는 모멘트와 시스템 변형사이의 역학적 평형관계로부터 결정된다. 따라서 선압은 조정핸들의 설정선압으로부터 시스템의 모멘트 전달기구 및 시스템 변형을 고려한 역학적 해석에 의해 얻어질 수 있다.

2.2 선압 발생 기구

선압에 영향을 미치는 주된 인자는 설정선압, 토크전달축의 비틀림, 축하우징과 블레이드의 자중, 축하우징의 무게중심과 회전중심사이의 편차, 축하우징의 비틀림으로 생각할 수 있다.

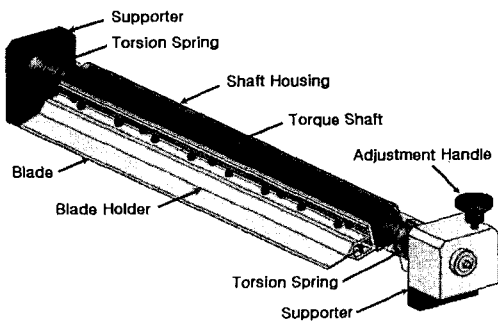


Fig. 1 Structure of the roll cleaner

2.2.1 설정선압

사용자가 조정 핸들을 조작하면 토크전달축 양단의 토션스프링을 통해 블레이드에 전달된 모멘트는 블레이드 선단에 선압을 발생시킨다. 이때 선압에 의한 시스템의 변형을 고려하지 않는다면 선압은 시스템 설정선압으로 블레이드 선단 전체에 균일하게 나타난다. Fig. 2는 이러한 사용자 설정에 의한 균일 선압을 도식화한 그림이다.

2.2.2 토크전달축의 비틀림

토션스프링에 의해 전달된 선압은 블레이드에 대한 반력으로 작용하여 토크전달축의 비틀림을 발생시키고, 결과적으로 전달 모멘트를 감소시켜 선압강하를 초래한다. 대형 압연롤러의 경우 토크전달축도 길어져 비틀림과 전달 모멘트의 손실도 커지게 된다. 우선 블레이드의 전 길이에 걸쳐 설정선압이 일정하다고 가정하면, 토크전달축 양단의 토션스프링을 통해 토크전달축에 전달되는 반력 토크 T_1 , T_2 는 설정선압에 필요한 토크와 같게 된다. 따라서 설정선압 p_m 으로부터 토크전달축에 피드백되는 토크는 균일선압에 의한 토크 전달축의 비틀림을 나타내는 Fig. 3을 참고하면 다음 식 (1)로 얻어진다.

$$T_1 = T_2 = \frac{0.5 \times p \times L}{10^4} \times l(\cos\theta - \mu\sin\theta) \quad (1)$$

여기서, θ 와 μ 는 각각 블레이드와 롤러표면사이의 접촉각(contact angle; Fig. 6 참조)과 마찰계수이고, L 은 블레이드 길이이며, l 은 토크전달축



Fig. 2 Nip pressure by the setup of user

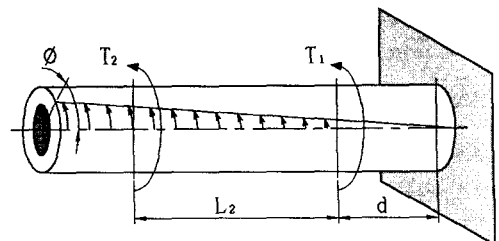


Fig. 3 Twist of torque shaft by the nip pressure

중심으로부터 블레이드 선단까지의 길이이다. 피드백 토크에 의해 토크전달축에 나타나는 비틀림은 토션스프링이 설치된 두 지점에 대해 각각 다음 식 (2)와 식 (3)으로 표현될 수 있다.⁽³⁾

$$\phi_1 = \frac{T_1 \times d}{GJ_{shaft}} + \frac{T_2 \times d}{GJ_{shaft}} \quad (2)$$

$$\phi_2 = \frac{T_2(d+L_2)}{GJ_{shaft}} + \frac{T_1 \times d}{GJ_{shaft}} \quad (3)$$

여기서 GJ_{shaft} 는 토크전달축의 비틀림 강성이고, d 는 조정핸들로부터 토션스프링까지의 거리이다. 또, 토션스프링의 비틀림 강성을 k 라 하면, 토크가 블레이드에 전달되는 과정에서 토크전달축의 비틀림에 의한 손실토크 T_1 , T_2 는 다음 식 (4)로 표현된다.

$$T_{1,2} = k\phi_{1,2} \quad (4)$$

따라서 손실토크에 의한 블레이드의 양단에서의 집중손실하중은 다음 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$F'_{1,2} = \frac{T'_{1,2}}{l(\cos\theta - \mu\sin\theta)} \quad (5)$$

또한, 선압은 두 집중하중에 대하여 선형을 유지하므로 역학적 평형으로부터 토크전달축의 비틀림에 의한 손실선압 p_r 을 유도하면 다음 식(6)과 같이 된다.

$$p_r = \frac{1}{L}(4F'_1 - 2F'_2) - \frac{6}{L^2}(F'_1 - F'_2)x \quad (6)$$

여기서 x 는 블레이드의 한쪽 단으로부터 길이 방향의 좌표 값이다. Fig. 4는 식 (6)으로 표현되는 토크전달축의 비틀림에 의한 선압강하양상을 나타낸다.

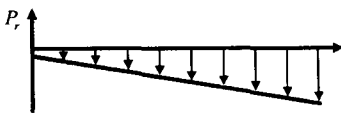


Fig. 4 Reduction of the nip pressure by the twist of the torque shaft

2.2.3 축하우징과 블레이드의 자중에 의한 처짐
축하우징의 처짐은 이와 일체형으로 조립되는 블레이드의 처짐을 의미하므로 선압에 직접적인 영향을 준다. 축하우징, 블레이드 홀더, 블레이드 중 블레이드의 무게는 다른 두 부품에 비해 무시할 수 있고, 또 블레이드 홀더는 축하우징에 고정되어 있으므로 축하우징의 일부로 고려한다. 축하우징은 양단지지보의 형태로 설치되고 전체 길이에 대하여 자중에 의한 균일분포하중을 받므로 중앙에서 최대 처짐이 발생한다. Fig. 5는 양단지지보의 형태로 구성되는 축하우징의 자유물체도와 그에 따른 처짐을 보여준다. 식 (7)은 이러한 축하우징의 처짐에 의한 선압변화(p_w)를 나타낸다. Fig. 6은 계산에 필요한 롤 크리너의 설치각(setup angle) λ 와 접촉각 θ 를 정의한다.

$$p_w = \frac{w x_1 (L_1^3 - 2L_1 x_1^2 + x_1^3)}{8f^3} \times \frac{EI_{blade}}{EI_{housing}} \times \cos\lambda \quad (7)$$

여기서 L_1 은 롤 크리너의 길이이고, w 는 균일분포하중, x_1 은 롤 크리너의 한쪽 단으로부터 길이 방향의 좌표값이고, EI_{blade} 와 $EI_{housing}$ 은 각각 블레이드와 축하우징의 굽힘강성을 나타내며, f 는 블레이드 폭이다. Fig. 7은 축하우징 자중에 의한 처짐으로 나타날 수 있는 선압(p_w)의 변화양상을 나타낸다.

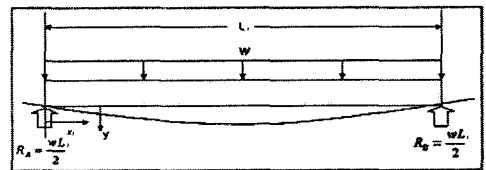


Fig. 5 Deflection of the shaft housing

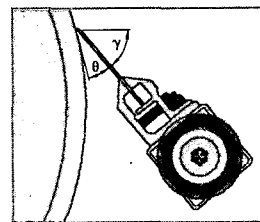


Fig. 6 Setup angle(λ) and contact angle(θ) of the roll cleaner

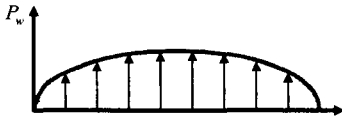


Fig. 7 Change of nip pressure by its own weight of shaft housing

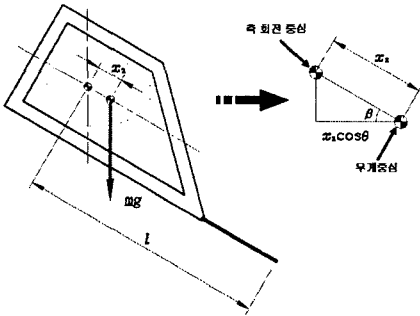


Fig. 8 Deviation between the weight center of the shaft housing and its revolution center

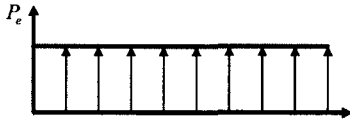


Fig. 9 Nip pressure by deviation between the weight center of shaft housing and its rotation center

2.2.4 축하우징 무게중심과 회전중심사이의 편차 일반적으로 축하우징은 단면 형상에 따라 무게 중심과 토크전달축의 회전중심이 일치하지 않는다. 따라서 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 두 중심 사이의 편차로 회전 모멘트가 발생하여 선압에 영향을 준다. 다음 식 (8)은 그 크기를 나타낸다.

$$p_e = \frac{mg \times x_2 \times \cos\beta}{l} \quad (8)$$

여기서 mg 는 축하우징의 하중이고, β 는 두 중심의 편차 각이다. 따라서 축중심 편차에 의해 발생하는 선압은 Fig. 9와 같이 일정한 형태로 나타난다.

2.2.5 선압에 의한 축하우징의 비틀림 블레이드가 롤러표면에 접촉하여 선압을 발생

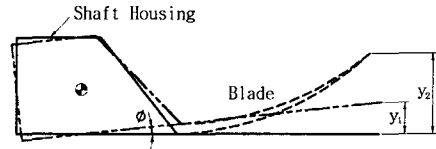


Fig. 10 Deflections of blade and shaft housing

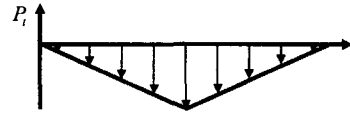


Fig. 11 Reduction of the nip pressure by the twist of the shaft housing

시키면 그 반력으로 다시 블레이드의 처짐과 축하우징의 비틀림이 발생하며, 이는 선압변화의 원인이 된다. Fig. 10은 이를 나타내는 롤 크리너 단면의 동작 개념도이다.

균일분포선압 p 에 의한 블레이드의 처짐과 축하우징의 비틀림은 외팔보에 관한 처짐이론에 의해 각각 다음 식 (9), 식 (10)으로 표현된다.⁽⁴⁾

$$y_1 = \frac{pL^3}{3EI_{blade}} \quad (9)$$

$$\phi = \frac{pL^2}{2GJ_{housing}} \quad (10)$$

여기서 $GJ_{housing}$ 은 축하우징의 비틀림 강성이 다. 따라서 축하우징의 비틀림에 의한 선압강하는 비틀림이 중심에서 최대이고, 양단에서 영으로 되는 선형관계임을 고려하면 다음 식 (11), 식 (12)로 표현된다. Fig. 11은 축하우징의 비틀림에 의한 선압 변화양상(p_t)을 나타낸다.

$$y_2 = \phi l \quad (11)$$

$$p_t = \frac{3EI_{blade}}{l^3} y_2 \quad (12)$$

한편, 재료 거동에 관한 처짐이론에 의하면 하중에 의한 처짐량이 작을 경우 하나이상의 하중에 의한 처짐은 개개의 하중에 대한 처짐의 합과 같다는 중첩이론이 유효하다. 따라서 다양한 변

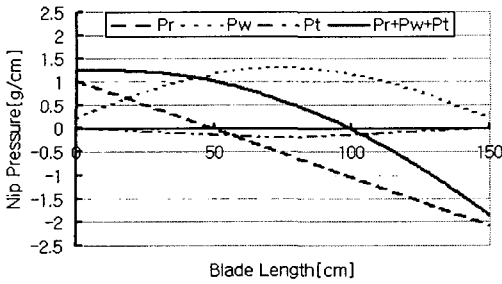


Fig. 12 The simulated nip pressure components

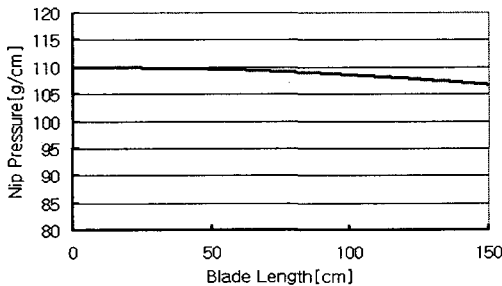


Fig. 13 The simulated resultant nip pressure

동요인이 존재하는 롤 크리너의 선압은 여러 선압영향 요인과 그 해석 결과의 중첩으로 구할 수 있다. Fig. 12는 설정선압을 제외한 선압 변동성분을 계산한 값으로, 각각 토크전달축의 비틀림에 의한 손실선압(p_r), 축하우징의 자중에 의한 변동선압(p_w), 선압에 의한 축하우징의 비틀림 영향성분(p_t)을 나타낸다. Fig. 13은 Fig. 12에서 적용된 선압변동성분 외에 설정선압(p_m), 중심간편차에 의한 선압성분(p_e)을 포함하여 중첩이론을 적용한 이론해로 전체 해석 선압의 분포를 보여 준다. Table 1은 실제 해석에 사용한 롤 크리너의 사양이다.

3. 선압의 측정

3.1 측정방법

롤 크리너 블레이드의 롤러 표면에 대한 압력으로 정의되는 선압은 앞에서 논의된 여러 선압 발생요인과 그 밖에 블레이드의 굴곡 및 재질 불균일 등으로 인하여 블레이드의 위치에 따라 달라진다. 따라서 블레이드 위치에 따른 선압측정이 필요하며, 정확한 측정을 위해서는 측정 중 발생할 수 있는 측정간섭을 최소화하여야 한다.

Table 1 Specification of the analyzed roll cleaner

Specification item	Value
Blade length	150[cm]
Blade width	4.28[cm]
Blade thickness	1.0[mm]
Blade material	Plastic(POM)
Set up angle	25°
Contact angle	25°
Deviation between two centers	1.4[cm]
Setup nip pressure	100[g/cm]

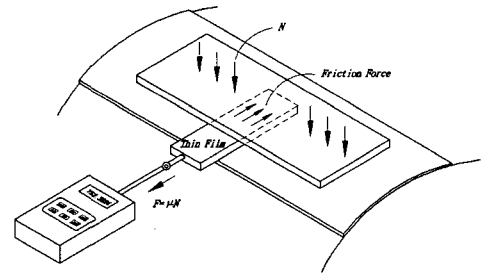


Fig. 14 Measurement of the nip pressure by a thin film and a pull type load cell

일반적인 로드셀의 경우 얼마간의 두께를 피할 수 없으므로 측정간섭을 피할 수 있는 설치가 불가능하다. 또한, 스트레인지지를 블레이드 표면에 설치하여 선압을 간접측정하는 방법도 블레이드의 비선형성에 따른 기생 스트레인으로 인하여 요구되는 측정정도를 얻을 수 없다. 본 연구에서는 측정에 따른 간섭을 최소화하면서 원하는 국소부위의 선압을 효과적으로 측정할 수 있는 방법으로 마찰력을 이용한 측정방안을 고안하였다.

블레이드와 롤러표면 사이의 마찰력은 선압에 해당하는 수직력과 마찰계수의 곱으로 표현된다. 따라서 롤러표면과 블레이드사이에 충분히 얇은 필름을 설치하고 풀 타입 로드셀(pull type load cell)을 이용하여 필름을 당기면서 풀하중(pull load)을 측정하면, 마찰계수와와의 관계로부터 블레이드의 수직력 즉, 선압을 얻을 수 있다. 이때 마찰계수는 선행실험으로 알 수 있으며, 롤러표면에 측정을 위한 얇은 필름을 덧씌우면 롤러표면의 상태에 따른 마찰계수 변화를 배제할 수 있다. Fig 14는 풀 타입 로드셀을 이용한 선압측정의 개념도이다.

Table 2 The measured pull loads and the normal forces, and the obtained friction coefficient

No.	Normal force[g]	Pull load[g]	Friction coefficient(μ)
1	220	82	0.373
2	364	130	0.357
3	408	131	0.321
4	330	121	0.367
5	375	130	0.347
6	287	103	0.359
7	301	101	0.336
8	350	130	0.371
9	270	107	0.396
10	340	120	0.353
11	372	131	0.352
12	410	134	0.327
Ave.	336	118	0.355

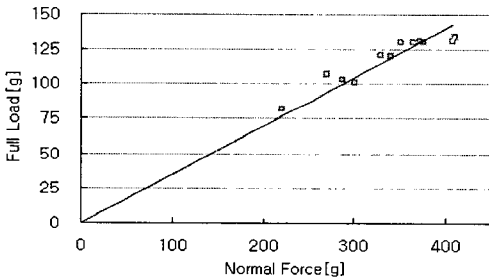


Fig. 15 Linearity of the nip pressures and the pull loads measured

3.2 선압측정 실험 및 고찰

먼저, 블레이드와 롤러표면사이의 필름이 갖는 마찰계수를 측정하기 위하여 전자저울 위에 롤 크리너를 설치하고 블레이드와 롤러 표면을 대신 하는 저울의 상판사이에 얇은 필름을 끼워 수직력과 이에 따른 풀하중의 변화를 관찰하였다. Table 2는 실험결과로서 얻어진 마찰계수와 그 평균값이다.

Fig. 15는 Table 2에 보여지는 실험결과를 그래프로 나타낸 것으로 수직력 즉, 블레이드 선압과 필름의 풀하중이 선형으로 근사화할 수 있음을 보여준다. 따라서 마찰계수를 일정한 값으로 가정할 수 있으므로 풀하중에 의한 선압측정이 유효한 방법임을 알 수 있다.

Fig. 16은 얇은 필름에 의한 풀하중과 선압측정 예를 보여준다. Fig. 17, Fig. 18은 각각 플라스틱과 강철 블레이드를 사용하여 얻은 측정값과 이

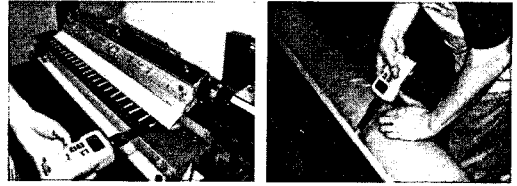


Fig. 16 Measurement of the pull loads and the nip pressures

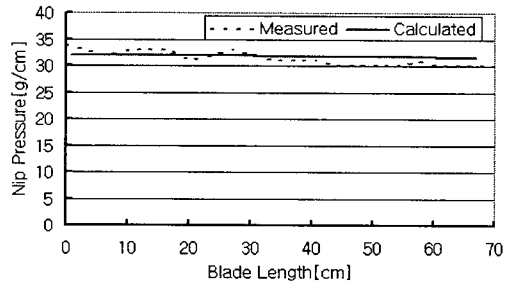


Fig. 17 The analyzed and measured nip pressures for a plastic(POM) blade with blade length $L=67\text{cm}$, setup angle $\lambda=48^\circ$, contact angle $\theta=25^\circ$ and setup nip pressure $p_m=25\text{g/cm}$

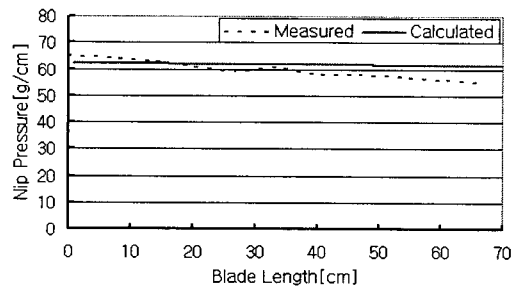


Fig. 18 The analyzed and measured nip pressures for a stainless steel blade with $L=67\text{cm}$, $\lambda=48^\circ$, $\theta=25^\circ$ and $p_m=55\text{g/cm}$

론값을 비교한 것이다. 두 가지 블레이드 재료 모두 블레이드의 한쪽 끝단으로 갈수록 선압이 작아지는 경향은 같게 나타났다. 그러나 그 크기를 비교해 볼 때 이론선압의 경우 선압 감소량이 2% 정도로 상대적으로 작게 나타나는 반면, 측정 선압은 10% 정도로 보다 큰 감소를 보여 준다.

Fig. 19는 플라스틱 블레이드의 길이를 2배로 증가시켜서 얻은 이론과 측정값으로 선압의 감소는 같은 경향을 보이거나 오차가 10% 정도로 심하

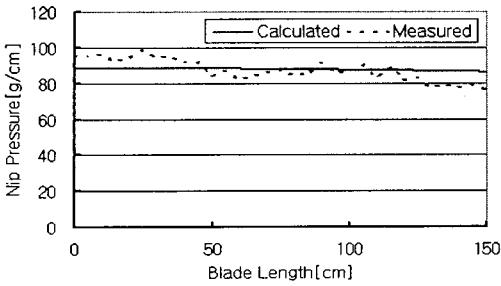


Fig. 19 The analyzed and measured nip pressures for a plastic(POM) with L=150cm, $\lambda=48^\circ$, $\theta=25^\circ$ and $p_m=80\text{g/cm}$

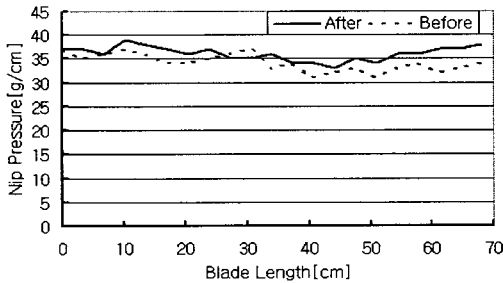


Fig. 20 Nip pressure change for torsion spring stiffness control

게 발생하였다. 이러한 결과는 이론 해석에서 미처 고려하지 못한 부품사이의 틈새, 블레이드의 접촉면 상태나 셋업오차에서 빚어지는 것으로 생각된다.

또한, Fig. 20은 양단에 설치된 토션스프링의 한쪽의 강성을 변화시켜서 측정된 선압의 전·후의 변화를 나타낸다. 두 측정선압의 비교에서 선압 변동은 비슷한 반면, 한쪽 토션스프링의 강성을 증가시킨 결과 선압처짐이 크게 줄어들었음을 보여 준다. 따라서 양단에서의 선압차에 의한 영향은 상대적으로 크므로 양단에서의 토션스프링 강성조정으로 선압을 일정하게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 롤 크리너 선압발생기구의 해석과 풀 타입 로드셀과 필름을 이용한 선압측정으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 토크전달축의 비틀림, 축하우징의 비틀림, 축하우징의 자중에 의한 처짐, 축하우징의 무게중심과 회전중심사이의 편차에 따라 선압변화가 발생한다.

(2) 롤 크리너의 선압을 일정하게 유지하기 위해서는 롤 크리너 양단의 선압을 일정하게 유지하는 것이 중요한 설계이며, 이를 위해 양단에 설치된 토션스프링의 강성을 서로 다르게 하는 방법이 가능함을 보였다.

(3) 풀 타입 로드셀과 얇은 필름을 이용한 선압의 측정은 매우 효과적인 방법임을 보였으며, 이러한 방법으로 롤크리너의 제작은 물론 설치현장에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

(4) 이상의 연구결과를 바탕으로 롤크리너의 성능 최적화를 위한 설계 개선을 위한 연구를 추가로 진행한다면 유용한 결과가 얻어질 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 순천대학교 산학협력중심대학 및 NURI 기계·우주항공교육사업단의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Kim D. W. and Hong S. I., 1991, "Study on the Sheet Rolling by a Rigid-Plastic Finite Element Method Considering Large Deformation Formulation," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 15, No. 1, pp. 145~153.
- (2) Soon-Kyung Kim, Eun-Chan Jeon, 2000, "A Study on the Surface Roughness of Work Roll and Strip in the Cold Rolling," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 4, pp. 17~24.
- (3) Gere & Timoshenko, 1984, "Mechanics of Materials," Brooks/Cole Engineering, California, pp. 131~136, 160~165.
- (4) Raymond Parnes, 2001, "Solid Mechanics in Engineering," Wiley, New York, pp. 481~489.