

섬유수학

- 실 (12) -

9. 불균제도(irregularity)

9.1 개요

별돌공이 벽돌을 한번에 한 개씩 아주 정확하게 배열해 쌓을 수 있는 것 같이 방적기술자들이 원하는 대로 방적기계가 개개의 섬유를 균일한 가닥으로 만들 수는 없다. 섬유가닥의 균일한 정도 혹은 불균일한 정도를 평균편차백분율(PMD), 표준편차(SD) 또는 변동계수(CV)로 나타낸다. 이 3단어에 대한 통계적인 의미는 앞의 제2장에서 설명하였다. 여기서 중요시하는 관점은 단지 이러한 값들이 나타내는 가닥의 특성에 관한 것이고, 그 다음 이들 특성을 통계적으로 처리하는 것이다.

측정된 가닥의 특성은 근본적으로 가닥의 단면에 있는 섬유의 올 수이며, 이의 변동을 PMD, SD 또는 CV로 나타낸다. 측정방법에는 기계식, 광전자식, 정전용량식 장치가 있고 또한 결과를 적절한 형식으로 표현한다. 이러한 균제도시험기의 계기는 정확도의 정도에 따라 시료의 단면에 있는 섬유의 평균 올수 N의 변동량을 가리켜 준다.

방적기가 섬유 한올 한올을 조절할 수 없기 때문에 CV가 0이 되는 것은 불가능하다. 이론적으로 가능한 방적사의 가장 균일한 가닥은 섬유의 한올 한올이 실의 길이 방향으로 아주 랜덤(random)하게 분포되어 있을 때이다. 그러한 가닥의 CV는 다음 식으로 표시된다.

$$V_r^2 = \frac{100^2}{N} + \frac{V_m^2}{N} \dots \dots \dots (22)$$

여기서, V_r = 실의 CV

N = 실단면의 평균섬유올수

$$V_m = \text{단위길이당 섬유무게 } CV$$

어떤 섬유와 실의 선밀도에 대하여 식(22)는 실제의 기계에 대한 “한계불균제도(limit irregularity)”가 있음을 보여준다. 이 한계불균제도를 계산하여 생산된 제품의 실제 불균제도와 비교할 수가 있다. 그래서 계산한 한계불균제도를 V_r 이라 하고 실제의 변동계수를 V 라고 하면, V/V_r 를 계산할 수 있는데, 이 비를 불균제도지수(index of irregularity) I , 라고 말한다. 즉, 불균제도지수는

$$I = \frac{V}{V_r} = \frac{\text{실제 불균제도}}{\text{한계 불균제도}} \dots\dots\dots (23)$$

가장 균제한 슬라이버와 실의 경우, $I = 1$ 이 될 것이다. 그리고 I 의 값이 크면 클수록 그 가닥은 더 불균일한 것이다.

적당한 상수를 써서 식(22)를 간단하게 할 수 있는데, 면섬유의 경우 공식은 $V^2 = 106^2/N$ 이 되고 양모섬유의 경우 $112^2/N$ 이 된다. 실제로는 제품의 형태를 피하는 것이 좋으므로 면섬유의 한계 $CV = 106/\sqrt{N}$, 양모섬유의 한계, $V = 112/\sqrt{N}$ 로 바꿀 수 있다.

단면에 있는 섬유의 평균 올수는 아주 중요한 역할을 한다. 가닥이 굵을수록 즉, N 이 클수록 한계 불균제도는 작게된다. 다시 말해서 어느 변수의 실에서 굵은 섬유보다 가는 섬유를 사용하면 N 은 크게 될 것이다.

이에 대한 예를 몇가지 들어보자

[예제 39]

150mtex 섬유로 방직한 20tex 면사에 대한 한계불균제도를 계산하라. 만일 측정된 실제의 CV 가 23.2%라면 불균제도지수는 얼마인가?

실의 선밀도를 mtex로 표시하면 $20 \times 1,000$ 이다. 그러므로 평균섬유올수는 $20,000/150$ 즉, 약 134이다. 이를 공식에 적용하면

$$\text{한계 CV} = 106\sqrt{134} = 106/11.58 = 9.15\%$$

그리고

$$\text{불균제도지수, } I = \frac{\text{실제 CV}}{\text{한계 CV}} = \frac{23.1}{9.15} \approx 2.5$$

더 굵은 200mtex 섬유를 사용하고 방적 성능을 불균제도지수 2.5로 동일하게 유지시키면, 실제 CV를 구할 수 있다.

$$\text{한계불균제도} = 106/\sqrt{100} \text{ (새로운 } N = 100)$$

$$\begin{aligned} \text{결국, 추정 실제 CV} &= 10.6 \times 2.5 \\ &= 26.5\% \end{aligned}$$

[예제 40]

섬유의 평균직경이 $22\mu\text{m}$ 인 135tex 슬라이버의 CV가 8.5%이고, 이 슬라이버로 방직한 19tex 실의 CV는 22%일 때, 슬라이버와 실의 불균제도지수를 계산하라

계산함에 있어서 경미한 꼬임은 무시한다. 왜냐하면 섬유의 선밀도를 먼저 mtex로 결정해야 하는데, 꼬임을 생각할 경우 복잡해지기 때문이다. 정의에 의해서 mtex로 표시된 선밀도는 섬유 1km의 mg으로 표시된 무게이다. 직경이 $22\mu\text{m}$, 길이가 1,000m, 밀도가 1.3g/cm^3 인 원통형의 무게를 구해보자. 여기서 $1\mu\text{m} = 1\text{cm} \times 10^{-4}$ 이고 $1\text{km} = 1\text{cm} \times 10^6$ 이다.

$$\text{원통형의 부피}(\text{cm}^3) = \frac{(22 \times 10^{-4})^2}{4} \times 10^5$$

$$= \pi \times 121 \times 10^{-3} \text{cm}^3$$

또한 그 무게는

$$\pi \times 121 \times 10^{-3} \times 1.3 \times 10^3 = 495\text{mg}$$

$$\text{슬라이버의 섬유율수} = \frac{135 \times 1.000}{496} = 272$$

따라서

$$\text{한계 불균제도} = 112/\sqrt{272} = 112/16.5 = 6.8\%$$

실제 CV가 8.5%이므로

$$I = \frac{8.5}{6.8} = 1.25$$

실의 경우

$$N = \frac{19 \times 1,000}{495} \approx 39$$

$$\text{한계불균제도} = \frac{112}{\sqrt{39}} = \frac{112}{6.25} \approx 18\%$$

$$\text{불균제도지수} = \frac{22}{18} = 1.22$$

[예제 41]

CV가 12.4%이고 선밀도가 49tex인 실이 3.3dtex의 섬유로 방적되었다. 이 실에 대한 최대 허용 CV를 25%라고 할 때, 이 섬유로부터 방적할 수 있는 가장 가는 실의 선밀도를 추정하라.

이 문제에서 섬유의 형태에 대한 언급이 없는데, 섬도는 decitex(dtex)로 나타내

서 3.3 즉, 0.33tex이다. 3.3dtex는 3D에 해당하고 섬유는 인조섬유라고 가정하다.
한계불균제도는 다음의 공식에 의해 산출된다.

$$\text{한계CV} = 100/\sqrt{N}$$

49tex 실의 단면에 있는 섬유올수

$$49\text{tex 실의 단면에 있는 섬유 올수} = \frac{49}{0.33} = 147$$

그러므로

$$\text{한계불균제도} = \frac{100}{\sqrt{N}}$$

$$\frac{100}{\sqrt{147}} = \frac{100}{12.1} = 8.3\%$$

이로부터

$$I = \frac{\text{실의 불균제도}}{\text{한계불균제도}} = \frac{12.4}{8.3} \approx 1.5$$

최대허용 CV가 25%인데, 이것은 다른 말로는 최대 한계불균제도와 불균제도지수를 곱하면 25가 된다는 말이다.

그러므로

$$\text{한계불균제도} \times 1.5 = 25$$

$$\text{즉, 한계불 제도} = \frac{25}{1.5} = 16.7\%$$

한계불균제도가 16.7%가 되려면 실에 얼마나 많은 섬유들이 있어야 하는가를 결정해 보자. 즉

$$16.7 = \frac{100}{\sqrt{N}}$$

또는

$$N = \left(\frac{100}{16.7}\right)^2 = 36$$

따라서 실의 선밀도는

$$\begin{aligned} N \times \text{섬유의 선밀도} &= 36 \times 0.33 \\ &= 12\text{tex} \end{aligned}$$

9.2 불균제도의 가법성

기계로 들어갈 때의 CV가 V_1 이고 나올 때의 CV가 V 라고 하면, 기계에 의해서 더해진 변동은 다음과 같이 계산된다.

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2$$

여기서, V_2 는 더해진 변동이다.

CV의 제곱을 상대분산(relative variance)이라고 하며, 보통 약해서 분산이라고 한다.

[예제 42]

방적기에 공급되는 슬라이버의 CV가 8.5%이고, 실의 CV는 22%이다. 방적기에서 얼마의 변동이 더해졌는가?

여기서, $V_1 = 8.5$ $V = 22$ 그리고 V_2 는 모른다. 공식을 적용하면

$$22^2 = 8.5^2 + V_2^2$$

$$\text{즉, } V_2^2 = 22^2 - 8.5^2 = 411.75$$

$$\text{그래서 } V_2 = \sqrt{411.75} \approx 20.3$$

그러므로 공정에서 공급되는 슬라이버에 약 20.3%의 CV가 더해졌다.

9.3 더블링의 효과

불균제도를 줄이는 하나의 중요한 기술이 더블링이다. 즉, 둘 혹은 그 이상의 가닥으로 만드는 과정이다. 만일 동일한 CV를 갖는 n 가닥의 섬유를 더블링시킨다면, 그 합해진 가닥의 CV는 다음과 같다.

$$\text{합해진 가닥의 CV} = \frac{\text{각 가닥의 CV}}{\sqrt{n}}$$

[예제 43]

각각의 CV가 8%인 두 로빙의 정방에 공급된다. 이 때 정방기가 18%의 CV를 더한다면 생산되는 실의 CV는 얼마인가?

앞 공식으로부터

$$\begin{aligned} \text{실질적인 공급 CV} &= \frac{\text{각 로빙의 CV}}{\sqrt{2}} \\ &= 8/1.4 = 5.7\% \end{aligned}$$

정방기에서 18%가 더 해지므로 생산되는 실의 CV를 V 라고 하면

$$\begin{aligned} V^2 &= 5.7^2 + 18^2 \\ &= 32.49 + 324 = 356.49 \end{aligned}$$

그러므로 생산되는 실의 $CV = \sqrt{356.49} \approx 18.9\%$

[예제 44]

오픈엔드 정방기에서 튜브를 토에 평균 2올의 섬유가 드럼으로 지나가는데, 이 섬유들의 불균제도지수를 1.5라고 할 때 다음을 계산하라.

- ① 섬유유동밀도의 변동계수
- ② 변동계수와 선밀도(tex)
- ③ 실의 불균제도지수

여기서 드럼에서 200회의 더블링이 있었고 섬유 선밀도는 0.1tex라고 가정하자.

- ① N을 단면에 있는 섬유올수라고 할 때 랜덤불균제도는 $100/\sqrt{N}$ 이므로

$$\text{랜덤 불균제도} = \frac{100}{\sqrt{2}} = \frac{100}{1.414} = 70.6\%$$

$$\text{불균제도지수, } I = \frac{\text{실제불균제도}}{\text{랜덤 불균제도}} \text{이므로}$$

$$1.5 = \frac{\text{실제 CV}}{70.6}$$

$$\text{실제 CV} = 1.5 \times 70.6 = 106\%$$

- ② 생산된 실의 선밀도 = $200 \times 2 \times 0.1 = 40\text{tex}$

즉, 더블링수 $\times$ 섬유의 올수 $\times$ 섬유의 선밀도 = 40tex

더블링을 하면 CV는 줄일 수 있지만 I의 값에는 변화가 없으므로

$$1.5 = \frac{\text{실제 CV}}{\text{랜덤 불균제도}}$$

40tex의 실의 경우

랜덤 불균제도 = $100/\sqrt{400}$ (왜냐하면 실단면에는 400올의 섬유가 있기 때문임)

$$\text{랜덤 불균제도} = \frac{100}{20} = 5\%$$

그러므로 실제 $CV = 1.5 \times 5 = 7.5\%$

위에서 더블링은 불균제도지수에 영향을 미치지 않는다고 했으므로 1.5이다.

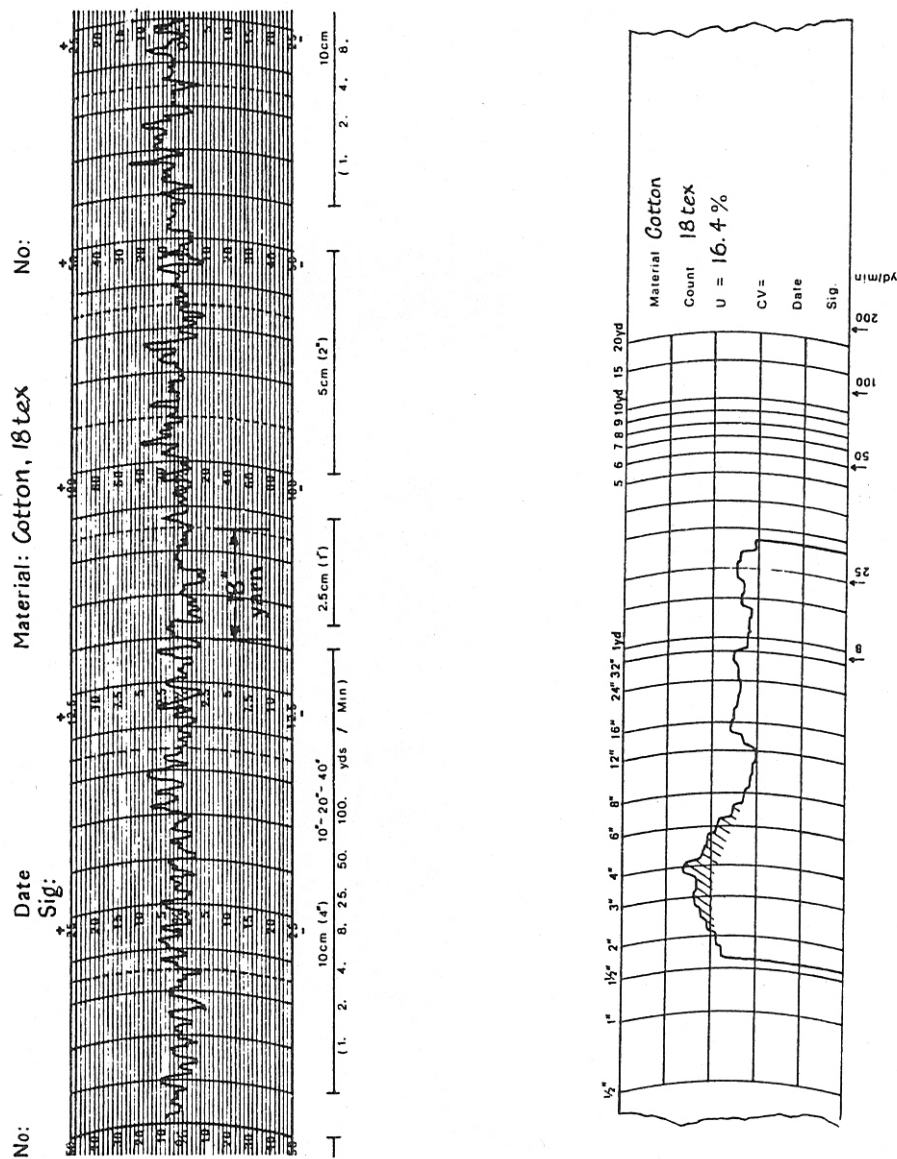
9.4 불균제도 차트(irregularity chart)

불균제도측정장치의 기록펜은 실의 평균두께에서 벗어난 실의 두께의 편차를 차트로 그린다. 차트속도를 시료속도와 동일하게 하는 것보다 관독하기에 편리한 곡선을 그릴 수 있게 차트의 속도를 변경시켜 정하는 것이 좋다. 차트속도에 대한 시료속도의 비를 보통 차트 컨트랙션(chart contraction)이라고 하난. 시료속도가 8yd/min이고 차트속도가 4in/min이 FEO 차트 컨트랙션은 72:1이 될 것이다. 시험조건에 알맞은 차트 컨트랙션을 선택한다. 예를 들면 만일 단주기 변동을 중요시 한다면 10:1이 가장 효과적이지만 시료의 장주기변동에 관심을 쏟는다면 200:1이 적당할 것이다. 차트를 검토할 때 차트 컨트랙션이 얼마였는가를 아는 것이 중요하다.

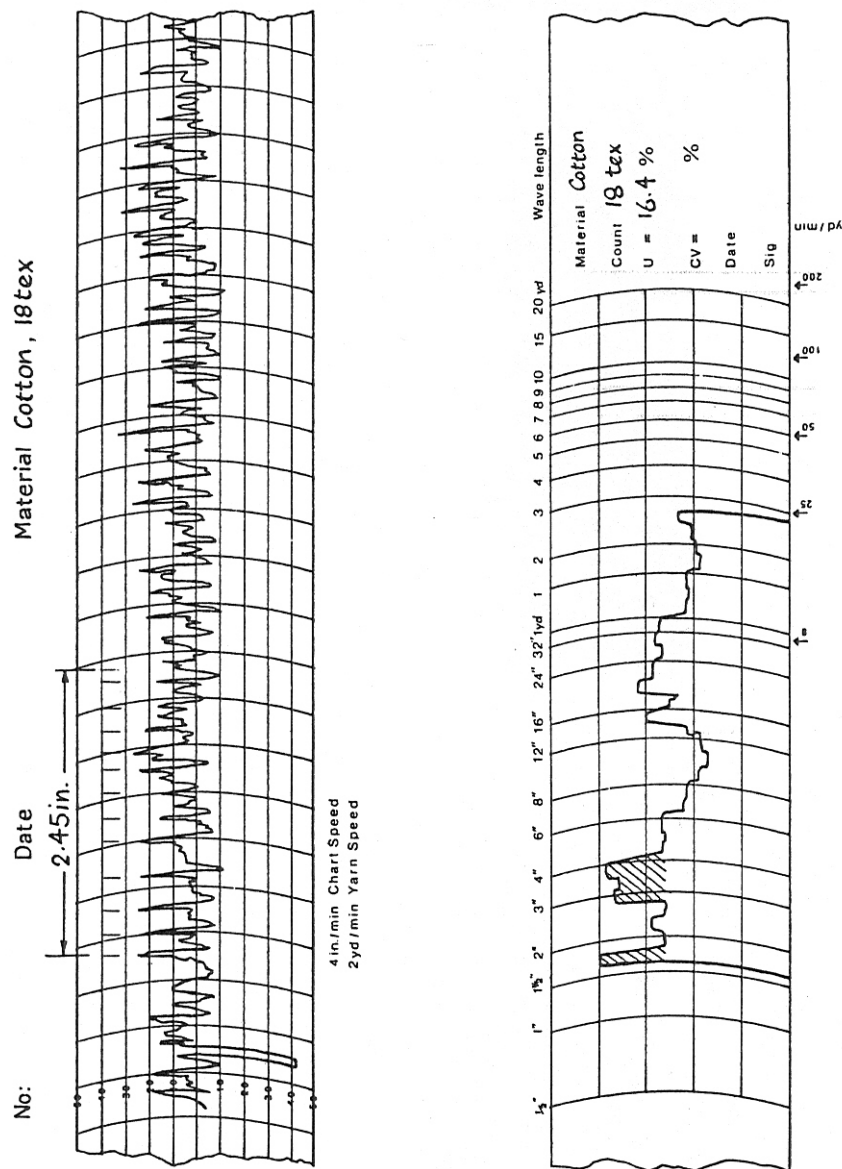
정상적인 랜덤변동에 더해진 일련의 변동을 나타내는 차트를 <그림 26(b)>에서 보였는데, 이 차트로부터 시료가 주기적인 결함을 갖고 있다고 추정할 수 있다. 한 정점으로부터 다른 정점까지의 평균거리를 차트로부터 구해서 주기적 결함(periodic fault)의 결장(weave length)을 얻기 위해 차트 컨트랙션을 곱한다.

한편 주기적 결함의 파장을 구하는 다른 방법으로서 특별한 장치를 사용한다. 예를 들어 Uster의 스펙트로그래프(spectrograph)는 Uster evenness tester와 함께 연관되어 작동하는 전자역학적인 기계이다. 이의 기능은 균제도시험기로 시료의 불균제도 스펙트럼 또는 스펙트로그램을 그리는 것이다. 시험하는 동안 균제도시험기

로부터 시호들이 스펙트로그래프로 보내지며 특수한 회로에 의해서 이를 분석한다. 약 5분동안 시험한 후 버튼을 누를 때까지 이 정보는 저장되어 있고 기록펜은 스펙트로그램을 그린다. 스펙트로그램의 수평눈금은 파장을 나타내고 수직눈금은 그의 크기 또는 빈도의 정도를 나타낸다. <그림 26>의 (a)와 (b)에서 계단식 선을 잘 분석해야 한다. 이 계단식 선은 파장범위가 30개의 좁은 띠(band)나 채널로 분리되기 때문에 생긴다. <그림 26(a)>의 스펙트로그램은 약 4in 정도의 드래프트파를 나타내고 (b)는 1.75in와 3.5in 거리의 주기를 갖는다는 것을 가르킨다.



<그림 26(a)> 불균제도 차트 : 정상적인 면사



<그림 26(b)> 불균제도 차트 : 주기적 결함을 가진 실

파장의 값은 결함의 원인이 되는 부분에서 유래된다. 결함이 일정한 파장으로 생기며 그의 주기적 특성이 명백한 때는 언제나 결함이 있는 부분의 회전운동에 의한 기계적 결함으로 유발되는 것이다. 드래프트별(train)에서의 톱니바퀴에 결함이 있다면, 이 바퀴가 회전할 때마다 드래프트 특성의 변화를 유발시킨다. 생산품에 대한 결함의 파장은 결함이 있는 바퀴가 한번 회전할 때의 시간동안 프런트 롤러에 의해 전달된 거리가 될 것이다. 이러한 사실은 다음과 같은 관계식을 사

용하여 주기성의 원인을 추적할 수 있는 방법을 제공한다.

$$\text{변동의 파장} = \frac{\text{프런트롤러의 송출속도(cm/min)}}{\text{결함이 있는 톱니바퀴의 rpm}}$$

그러므로

$$\text{결함이 있는 휠의 1분간 회전수(rpm)} = \frac{\text{프런트 롤러의 송출속도(cm/min)}}{\text{파장}}$$

기계설명서를 참조하면 연차계획표(gearing plan)로부터 결함이 있는 톱니바퀴를 확인 할 수 있다. 또한 회전속도계(tachometer)를 사용하여 각 부분의 회전수를 측정함에 의해서도 결함이 있는 부분을 찾을 수 있다.

고장이 있는 롤러를 찾아내는 또 다른 유용한 공식은 다음과 같다.

결장이 파장 = $D \times \pi \times$ 결함이 있는 롤러와 프런트 롤러 간의 드래프트

여기서, D는 결함이 있는 롤러의 직경

[예제 45]

25tex의 실이 34m의 장주기 파장을 보인다. 연조기, 조방기, 정방기를 거치는 동안 연조슬라이버는 3ktex이고 로빙은 500tex이며 링방적사는 25tex이다.

34m위 파장으로 보아 결함이 정방 이전의 공정에서 생긴 것으로 본다. 정방기의 드래프트는 500/25이다. 즉 로빙 선밀도와 실의 선밀도와의 비는 20이다. 파장 34m를 20으로 나누면 1.7m가 된다. 이것은 링 정방기로 공급되는 로빙에서 계산될 수 있는 파장값이다. 그러므로 조방기의 드래프트 영역에서는 결함을 일으키지 않는 것 같다. 조방기의 드래프트는

$$\frac{3 \times 100}{500} = 6$$

1.7m를 6으로 나누면 28.33이다.

이 값은 연조슬라이버에서의 주기성의 추정치이다. 연조기를 검토해보면 톱 롤러의 지름이 30mm이고 2번째 롤러와 프런트 롤러와의 드래프트 3이라는 것을 알 수 있다. 이 값들을 위의 공식에 적용하면

$$\text{결합의 파장} = 28.33 = D \times \pi \times 3$$

그러므로

$$D = \frac{28.33}{\pi \times 3} = 3\text{cm}$$

결국, 결합을 일으키는 부분은 연조기의 2번째 롤러라는 것을 알 수 있다.

9.5 드래프트 파(drafting wave)

드래프트되는 섬유의 문제점 중의 하나는 드래프트되는 섬유의 드래프트파가 도입된다는 사실이다. 롤러 드래프트 방식의 경우 한 쌍의 롤러 nip에서 다음 쌍의 롤러 nip까지의 간격은 고정되어 있다. 이 간격 혹은 세팅(setting)은 방적공정에서 매우 중요한 요소가 된다. 간격이 너무 가까우면 많은 섬유들이 두 nip에서 동시에 잡히게 되므로 섬유가 끊어지게 되며 또 너무 넓으면 섬유를 조절할 수 가 없다. 여러 종류의 섬유에 대해서 그들의 길이 분포성질에 따라 적당한 세팅을 해야 한다. 적당한 세팅에서조차도 짧은 섬유들은 확실하게 조절할 수가 없다. 방적기술자들은 이러한 섬유를 부유섬유(floating fiber) 라고 부른다. 드래프트된 가닥은 굵은 부분과 얇은 부분을 주기적으로 가지게 된다. 이러한 형태의 불균제도의 파장은 평균섬유장의 약 2.5배이다.