

UF수지 사용 절감을 위한 Fiberboard 공정의 Blow Line 분석

김수민[†] · 심재현¹

송실대학교 건축학부, ¹동화기업(주) 부설연구소
(2009년 5월 9일 접수)

Analysis of Blow Line for Reduction of Urea-Formaldehyde Resin Use in Fiberboard Manufacturing Process

Sumin Kim[†] and Jae-Hyeon Sim¹

School of Architecture, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea
¹R&D Center, Dongwha Enterprise Co. Ltd., Inchon 404-250, Korea
(Received May 9, 2009)

1. 서 론

섬유와 수지의 혼합은 MDF 공정 중 가장 중요한 단계 중의 하나로서 1960년대 중반에 MDF 생산이 시작되었을 때, fiber를 먼저 건조하고 수지를 혼합하는 일반적으로 PB 공장에서 사용했던 것과 같은 형태의 수지 혼합기를 사용하여 fiber와 요소 또는 요소-멜라민 수지를 혼합하였다. PB 생산에 사용되는 다소 흐름이 없는 원료와는 달리 MDF 제조시 사용되는 보풀보풀하고 부피가 있는 섬유는 덩어리지는 경향이 있어 혼합시 어떤 회전 운동은 섬유를 둥글게 뭉치게 하며, 원료에 외부 압력은 섬유를 서로 붙잡게 만든다. 그러므로 수지도포가 불균일하며, 섬유가 수지혼합 후 다시 보풀보풀해질지라도 만족스러운 결과를 얻을 수 없다[1-3].

수지의 혼합에는 고려되어야 할 많은 목재인자가 있다. 목재의 습윤성, 흡습성, 목재 입자 또는 섬유의 표면 조직, 입자 또는 섬유의 접촉면적, 그리고 목재 표면의 노화 등이다. 이들 모든 인자는 보드가 얼마나 잘 접착되는지에 대한 효과를 가지고 있으며, 밀도, pH, 그리고 추출물과 같은 수종간의 변이뿐만 아니라 섬유의 흡수율과 과건조되거나 오염된 목재표면 또한 수지 혼합 공정에 영향을 주며 결과적으로 보드의 접착에 영향을 준다[4-6].

수년 간 많은 연구를 통해 PB와 MDF 원료에 수지, 왁스, 그리고 기타 첨가제의 효율적인 혼합을 위해 노력을 기울여 왔으며, MDF 산업에서는 최종 보드제품의 완

벽함을 얻기 위해 노력해 왔다. 건식 MDF의 최초 개발 시 건조된 섬유에 수지를 혼합하는 것이 일반적인 기술이었으나 강도, 두께팽창 등 보드의 물리적 성질이 만족되지 않았으며, 표면에 수지반점에 기인하는 얼룩이 종종 발생되어 보기 흉하고 표면 마무리 적용시 문제로 대두되었으며, 표면의 수지반점을 제거하기 위해 Blow line 혼합 방식이 개발되었으며, MDF 산업에서 거의 교체되었으나 이 방법은 수지 사용량이 많은 관계로 현재는 Blow line 혼합시 수지 사용량을 절감할 수 있는 방법 모색과 기계적 혼합을 다시 재검토하는 단계에 접어들었다[7,8].

Blow line에서의 수지 사용량 절감을 위한 노력으로 1960년대부터 수지 접착효율성 향상 방법을 모색하기 시작하였으며 70, 80년대에는 수지 접착효율성 분석 기술에 대한 연구가 수행되었으나, 컴퓨터와 화상분석 기술의 발전으로 90년대에 접어들면서 수지 접착효율성 연구가 활성화되기 시작하였다. Youngquist는[9] 수지 고형분 감소와 수지와 섬유의 마찰 작용 증가 및 수지 분사량의 변화로 수지 분포를 향상시키며, 이로 인한 섬유에 균일한 수지분포 유지는 MDF의 접착력이 증가됨을 보고하였다. 그러나 Blow line의 내부거동을 정확하게 분석할 수 없었으며, 단지 이론적인 추정에 불과하였다. Blow line 혼합은 “Black Box”로 명명되어 Blow line 내부에서 어떤 일이 일어나고 있는지 알 수 없음을 표현하였으나, 이후 수지 사용량 절감을 위해 Blow line에 대한 연구가 활성화되기 시작하면서 Blow line에 대한 이론과 실제적인 내부거동 측정 및 분석이 이루어졌으며, 수지 접착효율성 분석을 위한 수지 도포량을 측정

[†]Corresponding author: Sumin Kim (skim@ssu.ac.kr)

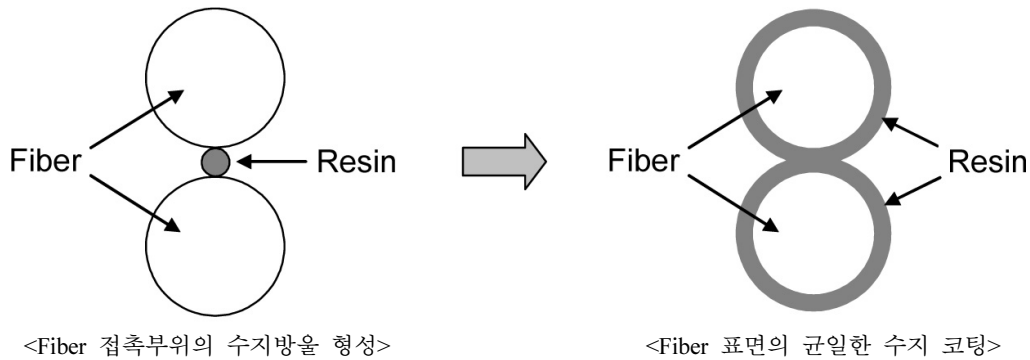


Figure 1. Coating of resin on fiber.

하기 시작하였다[10].

Blow line 혼합에 대한 산업에서의 실제방법을 조사한 결과, Blow line 혼합은 기계적 혼합에 비해 0.5~2% 정도 더 많은 수지를 요하며, 수지 분사는 일반적으로 Blow line과 직각으로 분사되지만 섬유와 흐름방향과 둔각으로도 분사가 가능함을 보고하였으며, 또한 수지 분사 위치는 Blow line 전부분에 걸쳐 행해지지만 주로 블로우밸브 직후, 첫 엘보우 직전, 첫 엘보우 다음 3~5 m, 건조기 입구 3~5 m에서 수지가 분사되고 있음이 보고되었다[11,12].

컴퓨터 화상을 이용한 PB의 수지 접착효율성에 관한 연구에서 컴퓨터 VISION 방법으로 수지의 drop size (수지 입자 크기)와 수지 도포량을 측정할 수 있게 되었으며, MDF 산업에서의 수지 혼합 개선 가능성에 관한 연구에서 Blow line 혼합시 수지 사용량 증가요인은 조기경화, 드라이어에서의 수지손실, 수지 분포에 있다고 보고되었다[13]. Robson은 FT-IR microscopy를 사용하여 UF와 MUF에 존재하는 amide $IC=O$ 그룹이 $1,660\text{ cm}^{-1}$ 영역에서 강하게 반응함을 이용하여 평균 피크 (peak)와 변이계수로 수지의 분포상태 및 분포량을 조사하였으며, MDF 섬유의 수지분사 혼합에 유동 모델을 이용하여 새로운 Blow line 적용으로 수지 도포량 증가 및 균일한 분포 유지로 접착력 9% 향상과 두께팽창을 14.3% 감소시킬 수 있음을 보고하였다[14]. 또한 Chapman은[15] 수지 혼합시 Blow line 운동학의 영향이란 연구 결과 섬유 품질, Blow line 속도, 수지분사 조건의 재정립으로 수지 사용량을 20~25% 감소시킬 수 있으며, Glue dosing system의 최적화로 여분의 수지 사용량 절감이 가능함을 보고하였다.

상기의 연구 내용과 같이 Blow line 최적화를 통한 수지 절감은 큰 효과가 있으리라 생각된다. 따라서 본고는 가장 보편적으로 널리 사용되고 있는 Blow line 수지 혼합에서의 Blow line 기초 이론과 메커니즘, Blow line의 구조적 특성 및 내부거동에 대한 고찰을 통해 Blow

line 최적화 및 수지 사용량 절감을 위한 방안을 고찰하는데 그 목적이 있다.

2. Blow line 혼합 이론

MDF산업에서의 Blow line은 섬유와 수지를 혼합하는 공정이다. 리파이너에서 발생된 스팀과 섬유의 혼합 유체는 스팀의 속도에 의해 Blow line을 통과하고 수지는 Blow line에서 분사되어 섬유와 혼합된다. Blow line에서 섬유와 수지 및 스팀이 혼합된 상태로 통과하면서, 섬유와 섬유간의 충돌 및 마찰로 인하여 수지가 섬유 표면에 분산되는 것이다.

동일한 품질의 강한 MDF를 제조하기 위해서는 각각의 섬유를 얽은 층의 수지로 완전한 코팅이 이루어질 필요가 있다. Blow line에서 이러한 코팅은 수지의 미세한 분무 또는 Blow line 내에서 섬유와 섬유간의 접촉에 의하여 큰 수지방울이 스며들어있어서 이루어질 수 있다. 섬유에 수지의 코팅 효과는 Blow line 내부의 난류 정도와 Blow line을 통과하는 섬유의 양에 달려있다. MDF효과는 블로접착제로 유간작용 한다면 가장 이상적인 수지의 분무는 섬유간의 접촉 부위에 유간수지방울이 떨어지는 것이다. 그러나 이러한 상황은 현실적으로 불가능하고, 최대한 같은 강도의 균일한 접착을 형성하기 위해서는 모든 섬유 표면에 수지가 고르게 퍼져 있도록 하는 것이다.

Figure 1과 같이 수지를 섬유 표면에 골고루 분산시키면서 최소량을 도포하는 것이 Blow line 최적화이다. 이러한 목적은 두 가지 방법으로 얻을 수 있다.

첫째, 매우 작은 직경의 수지 방울로 분사하는 것
둘째, 수지 분사 후 섬유와 섬유의 충돌을 극대화하여 수지방울과 섬유의 혼합 효과를 최대로 할 수 있는 난류 흐름을 만드는 것

위의 두 가지 방법은 Blow line 구조와 Blow line 내

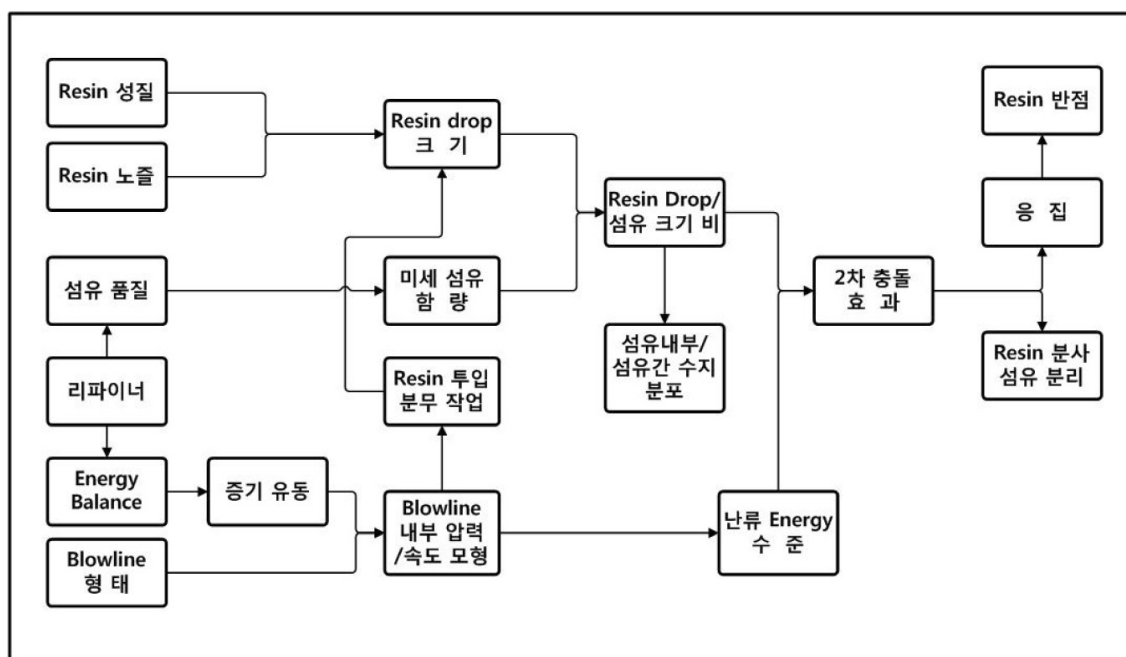


Figure 2. Blow line의 공정 요약[15].

부 거동 및 수지 분사조건에 따라 달라진다. 따라서 본 논문에서는 이들에 대한 분석과 당사 Blow line 구조 및 수지 분사조건 규명을 통한 수지 사용량 절감 방안을 마련하고자 한다. Blow line 공정의 이해는 리파이너 에너지밸런스부터 시작되어야 하며, 리파이너에서 증기 유동을 주고, Blow line 형태, 즉 직경과 길이와 함께 Blow line 내부 거동을 결정해주며, 섬유와 수지의 혼합효과 증진을 위한 난류 수준을 결정한다. 그리고 수지와 수지 분사노즐에 의한 수지방울 크기, 미세섬유 함량, 수지 분사조건 등의 변수에 의해 Blow line에서의 수지 혼합이 이루어진다. Figure 2는 Blow line의 공정을 요약하였으며, Blow line에서 발생할 수 있는 모든 요인이 정리되어 있다.

Blow line에서의 수지방울 형성은 유체분무기의 극미세 유체 방울의 형성과 유사하며, 기체와 액체가 혼합되어 가장 미세한 분사형태를 만들어내는 이류체 미세분무 노즐(air atomizing nozzles)의 일종이다. 미세분무 노즐 중에서도 외부 혼합방식으로 액체는 액체용 cap의 orifice에서 물기둥 형태로 분사되며, 그 직후에 기체용 cap의 orifice에서 분사되는 기체에 의해 물기둥이 분쇄되면서 분사된다.

3. 수지 분사 조건

3.1. 수지분사 노즐

Figure 3과 같이 고속 기체(증기와 섬유)의 운동에너

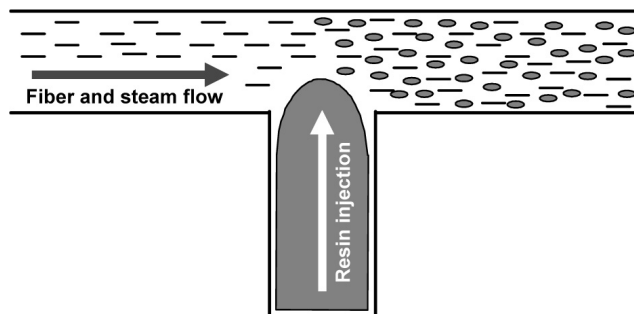


Figure 3. Schematic of resin injection in blow line.

지는 펌프로부터 노즐 orifice로부터 나오는 수지 방울과 충돌하면서 수지 방울을 분쇄시키는, 예를 들면, 강한 바람은 바다에서 파도를 일으키고 이 파도의 끝에 발생하는 액체 방울은 강한 바람에 의해 다시 분쇄되는 현상과 유사하다고 볼 수 있다. Blow line에서는 고속 증기에 의해 수지방울이 Blow line 내에서 더욱 잘게 부서져 혼합된다고 할 수 있다. 여기서 블로우벨브는 이류체 미세분무 노즐에서 기체용 cap의 orifice라 할 수 있으며, 이 orifice의 조절로 유량과 속도를 제어할 수 있는 것이다. 그러므로 리파이너의 블로우벨브 개폐율이 Blow line 내부에서의 증기 유동과 수지 분산성에 큰 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다.

3.2. 수지분사 압력

수지분사 압력은 수지의 분산성과 수지 분사방울의

Table 1. Average particle size of urea-formaldehyde resin

구 분	Fine	Medium	Coarse
크기(μm)	43	160	264

크기 결정에 크게 영향하며, 일반적으로 Blow line 내부 정압은 4~5 bar 정도로서 섬유에 양호한 수지 분포를 얻기 위해서 Siempelkamp에서는 수지분사 압력이 Blow line 내부 압력의 2배로서 약 8~10 bar 정도이어야 한다고 했으며, Sicoplan에서는 Blow line 내부 압력에 비해 약 2~3 bar 초과 압력으로 분사되어야 한다고 했다[16]. 따라서 수지 분사위치에서의 Blow line 내부 압력을 정확하게 측정할 필요가 있으며, 이때의 유속을 계산할 수 있다. 또한 이것을 근거하여 난류 정도를 측정하는 레이놀드 수 또한 계산되어진다.

이상과 같은 수지분사 노즐, 수지 분사위치, 수지 분사압력 등은 수지 분사방울의 크기를 좌우한다. 수지 분사방울의 크기는 접착의 개념이 도입되어야 하며, 목재와 수지의 접착 특성은 재료의 강도에 영향을 준다. 라디에타과인 MDF 접착력 시험의 표면 파괴를 조사한 결과 세포벽의 S1층과 S2층 사이에서 파괴가 일어남을 보고되었으며, 이는 수지가 S1층 또는 S2층까지 침투된다는 것을 의미한다[17]. 따라서 MDF의 접착력은 수지의 분산성과 수지 분사방울 크기와 밀접한 관계가 있다고 보인다. 또한 Chapman[18]은 접착력을 최대화하기 위해서는 모든 섬유가 2개 이상의 접착구조로 연결되어야 하며, 적어도 1개 이상의 수지 분사방울이 필요하다고 보고하였다. 다음은 이처럼 수지 분산성 및 MDF 접착력에 중요한 인자인 수지 분사방울 크기(resin drop size)에 대한 분석을 하고자 한다.

3.3. 수지 분사방울 크기(Resin drop size)

요소수지 입자 크기를 particle sizer로 분석해 보면 Table 1과 같이 알려져 있다.

수지 분사방울 크기 측정은 유체 분무기에서 분사된 방울 크기를 추정하기 위해 처음으로 개발된 실험식을 사용하여 Blow line의 내부 조건을 추정하여 계산하는 실험식이 있다.

$$D_{32} = \{0.95(\sigma_1 m_1)^{0.33} / (U_{rel} \cdot \rho_1^{0.37} \cdot \rho_g^{0.3}) + 0.13 \mu_1 [D_1 / (\sigma_1 \cdot \rho_1)]^{0.5}\} [1 + (m_1 / m_g)]^{1.7}$$

D_{32} : 평균 수지방울 직경(m), σ_1 : 액체 표면장력(N/m), m_1 : 액체유량(Kg/s), U_{rel} : 상대속도(m/s), ρ_1 : 액체밀도(kg/m³), ρ_g : 기체밀도(kg/m³), μ_1 : 액체점도(N · s/m²), D_1 : 액체 투입직경(m), m_g : 기체유량(kg/s)

Table 2. Comparison of spray resin size

구 분	수지 분사방울 크기(μm)
산업용 표준 Blow line (100 mm, 굽음)	98
직관의 Blow line (100 mm)	77
70 mm 직경의 Blow line	145

수지 분사방울 크기를 측정한 자료를 보면 Table 2와 같다.

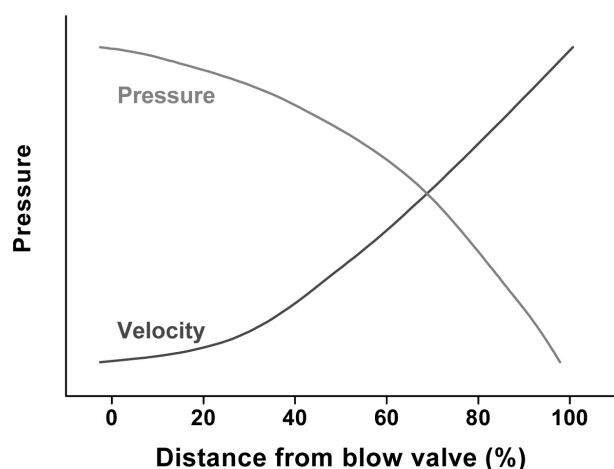
Table 2에 나타난 수지 분사방울의 크기가 일반적이라고는 생각하지 않는다. Blow line 내부의 증기유동, 압력, 유속, 분사 압력, 분사 위치 등 여러 가지 인자에 따라 상이하기 때문에 평균적으로 100 μm라는 것은 Table 7을 보면 알 수 있다. 목재섬유의 폭을 조사해보면 평균적으로 30 μm 정도로 요소수지 입자보다는 작은 것으로 나타나며, MDF에 주로 사용되는 수종의 섬유 성상은 Table 3과 같다.

수지가 섬유에 도포되면 섬유 폭 방향으로 섬유를 완전히 덮는 상태가 되며, 수지 분사방울 크기가 너무 크면 수지 손실이 있을 것이다. 물론 Blow line과 건조기를 통과하면서 섬유간의 마찰로 다른 섬유에 접착제를 묻히는 경우도 있을 것이고, Blow line 벽이나 건조기 벽에 묻히는 경우도 있을 것이고, 또한 수지와 수지가 만나서 큰 덩어리로 되는 경우도 있을 것이다. 따라서 수지 분사방울 크기가 지나치게 크다면 수지 손실뿐만 아니라 보드 표면에 수지반점이 나타날 수 있다.

섬유와 섬유와의 접착을 형성하기 위해서는 수지가 섬유와 인접 섬유 간에 충분히 가까운 지점에 존재하여야 한다. 최적의 시나리오는 수지 분사방울이 2개의 섬유 사이에서 접착을 형성하여야 하며, 2개 섬유와의 간격은 수지 분사방울의 능력을 결정해주는 수지 분사방울의 퍼짐성에 영향한다. 각각의 섬유에 2개의 접착을 위해서는 최소한 1개의 수지 분사방울이 존재해야 한다. Chapman에[18] 의하면 섬유 크기로부터 이 조건에 맞는 필요한 수지 분사방울 크기를 계산할 수 있다고 한다. 즉, 침엽수 섬유의 밀도를 400 kg/m³이라 가정하고 섬유에 1개의 수지 분사방울이 존재한다고 가정하면 10% 함지율이라면 계산된 수지 분사방울의 크기는 60 μm 정도이며, 이는 최대 크기로서, 만약 섬유가 작거나 섬유 부스러기가 존재한다면 섬유에 1개의 분사방울 일 경우 수지 분사방울 크기는 작아져야 하고, 섬유에 1개 이상의 수지 분사방울이 존재하려면 수지 분사방울 크기는 더 작아져야 한다. 수지 분사방울 크기는 10 μm가 이상적이며, 줄일 수 있는 최소 한계라고 말하고 있다.

Table 3. Characteristics of major species for MDF

구 분	육송	라디에타파인	리기다소나무	스프러스
전건비중	0.43	0.37	0.49	0.4
섬유길이(mm)	3.4	4.0	2.9	3.5
섬유폭(μm)	24~31	35~45	23.2~31.3	25~30
세포벽 두께(μm)	3.5~5.1	3.0	2.9~5.3	2.2
거칠기(mg/100 m)	40~45	30~40	-	16~29
리그닌 함량(%)	29.3	28.9	28.6	27.6

**Figure 4.** Pressure and velocity in blow line.

4. Blow line 내부 거동

4.1. Blow line 내부의 입력과 유속

Blow line 내부의 유체 흐름은 스팀, 섬유, 그리고 수지분사 방울로 구성되어 있다. Blow line의 전체 길이에 걸친 압력의 저하는 리파이너의 7~8 bar에서 건조기 내부의 대기압까지 매우 커서 Blow line에서 증기 흐름이 매우 빠르게 가속하게 된다. Blow line에서의 유체 흐름은 많은 외부적인 효과에 의해 영향을 받는데, 벽 마찰, 관 직경의 변화, 접합 및 굽음 부위에서의 마찰, 관 벽을 통한 냉각, 증발/응축 효과 등에 영향을 받는다. Blow line 내부의 유속과 압력은 섬유와 수지의 균일한 혼합과 Blow line 내부의 난류 형상에 크게 좌우된다.

Figure 4와 같이 일반적으로 블로우벨브에서 멀어질수록 압력은 떨어지며, 이 압력 차이로 인하여 속도는 빨라진다. Blow line 내부의 압력과 유속, 그리고 Blow line 형태와 내부 직경은 Blow line 내부의 유체 거동에 영향을 주어 수지의 도포 효율성 향상을 위한 난류 형성에 기여한다. 이와 같이 Blow line의 유체 흐름을 예측하기 위한 실험적 모델을 모색해왔으며, 이 Blow line 모델은 Blow line 성능 평가 및 비교, 새로운 Blow line의 설계 및 현 Blow line의 성능 개선, 또한 MDF 공장

조절시스템으로 사용될 수도 있으며, 이상적인 Blow line 흐름 조건을 결정할 수 있을 뿐만 아니라 Blow line 성능을 이상적인 Blow line과 비교하여 조절 가능할 것이다. 이것 때문에 많은 연구자들은 Blow line 모델 실험을 수행하고 있다.

Blow line에서 증기의 mass flow와 속도의 최적화 요인에 영향하는 요소 중의 하나가 바로 증기(스팀)이며, 증기의 mass flow와 속도는 수지 접착 효율성에 영향하며, 증기의 사용량 또한 리파이너와 건조의 최적화에 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 따라서 전반적인 시스템 최적화에는 주의 깊은 증기(스팀) 관리를 요하며, 이는 피할 수 없는 것이다. MDF 공장에서의 증기는 보일러에서 리파이너까지의 증기 흐름 및 증기 사용량을 관리 및 조사해야 하며, 섬유 생산에 대한 증기 사용량의 중량 비율을 계산해야 한다. 이 중량 비율은 Blow line에서 증기 흐름의 전체를 말할 수 없지만 증기의 일부는 유입되는 원재료 가열에 사용되며, 이는 리파이너에서 생성되는 부가적인 증기로 상쇄된다고 볼 수 있다. 그러므로 리파이너 시스템에 적용될 수 있는 모델을 개발하여 Blow line에서의 증기 흐름을 좀 더 정확하게 예측할 필요가 있으며, 섬유 생산에 필요한 보일러 증기의 중량 비율을 Blow line 조건에 근접시켜 수용함으로써 수지 접착효율성에 대한 증기 효과를 조사하는 정보로 사용 가능할 것이다. Blow line의 증기 유동은 리파이너 시스템에서의 모든 물질과 에너지를 합하여 결정되며, 일반적으로 시스템 전체 물 양의 35~70%가 Blow line에서 물로 존재한다. Blow line 한 지점에서의 증기속도는 증기 유동량, 압력, 횡단면적에 의해 결정되며, Blow line 시작지점의 압력은 리파이너 출력에 의해 결정되고, 리파이너 하우징 압력과 증기 유동을 위한 Blow line 압력 강하로 블로우벨브를 지나 압력은 떨어진다. Blow line의 압력이 감소됨에 따라 속도는 증가되고 증기의 비체적은 증가하게 된다. 건조기 입구에서의 압력은 기본적으로 대기압이며, 블로우벨브 다음의 유속은 25~100 m/sec 범위이다.

Chapman[18]은 Blow line에서의 증기 유동으로 섬유가 차지하는 부피 계산이 가능하다고 했으며, 그에 의하면

Table 4. Results of mixing in Blow line

Blow line 속도	충 돌	수지 분사방울 크기 > 섬유크기	섬유 크기 > 수지 분사방울 크기
낮음	섬유/섬유	탄성적, 가능성 희박	탄성적
	섬유/수지	응집	응집, 수지결합은 차후 충돌에서 보호
높음	섬유/섬유	탄성적, 가능성 희박	탄성적
	섬유/수지	전단력이 수지결합을 증가하기에는 부족	전단력이 수지결합을 파괴 수지분포에 도움

섬유 부피 비는 전 Blow line에 있어서 4% 이하이며, 증기와 섬유의 비가 가장 낮은 경우 Blow line 끝 부위에서 1% 이하로 떨어진다고 보고하였으며, 수지부피 역시 이와 유사하게 계산 가능하며, 수지 비중이 1.2이고, 섬유 중량대비 10%, 고형분 50%라면 수지 부피는 섬유 부피의 6.7% 정도라고 보고하였다. 미국 특허 (US Patent 4,514,255)에서는 섬유의 부피는 Blow line 부피의 0.2%에 불과하다고 보고되어 있다[19].

4.2. Blow line에서의 난류 형성

4.2.1. 난류와 레이놀드수

유체의 흐름은 그의 흐르는 상태에 따라서 층류와 난류, 실제유체와 이상 유체, 가역흐름과 비가역흐름, 정상류와 비정상류, 등류와 비등류, 회전흐름과 비회전흐름 등으로 구분되며, 여기서는 실제유체의 층류와 난류에 대해서 알아보기로 한다. 실제유체는 점성으로 인한 마찰 전단응력이 작용되는 유체의 흐름을 말한다. 유체의 점성으로 인한 마찰저항은 유동과정에서 손실일로 변환되어 결국 열의 형태로 소모되게 된다. 또한 유체의 점성 효과는 특히 경계면 근방에서 경계층을 형성하게 된다. 따라서 이상 유체의 흐름에서처럼 단면에 있어서 언제나 균일한 속도 분포를 얻을 수 없게 된다. 그리고 실제유체의 흐름은 층류 또는 난류에 따라서 그의 유동 특성이 크게 달라진다. 이와 같은 중요한 유동 특성을 구분하여 주는 기준은 레이놀드수이다.

실제유체의 흐름에 있어서 점성의 효과는 흐름의 상태를 두 가지의 서로 전혀 다른 유동상태를 만든다. 다시 말하면 실제유체의 흐름은 층류(laminar flow)와 난류(turbulent flow)로 구분된다. 여기서 층류에서는 유체의 입자가 서로 층의 상태로 미끄러지면서 흐르게 되며, 이 유체입자의 층과 층 사이에서는 다만 분자에 의한 운동량의 변화만이 있는 흐름이다. 한마디로 표현한다면 유체의 분자들이 모두 열을 지으면서 질서 정연하게 흐르고 있는 상태를 층류라고 한다. 반면에 난류는 유체의 분자들이 아주 심한 불규칙한 운동을 하면서 상호간에 격렬하게 운동량의 교환을 하면서 흐르는 상태를 말한다. 즉, 층류가 아주 질서 정연한 유체의 흐름이라고 말

할 수 있는 반면에 난류는 아주 무질서한 유체의 흐름이라 말할 수 있다.

이와 같이 실제유체의 흐름에 있어서 서로 판이한 유동 특성을 나타내는 층류와 난류의 구분은 레이놀드수 (Reynolds number)에 의해서 결정되며, 이것은 레이놀드의 실험적 관찰로부터 얻어진 결과이므로 레이놀드수라는 명칭을 사용한다. 레이놀드는 실험을 통하여 아주 작은 속도에서 유체입자는 서로 뒤섞임 없이 층과 층이 평행하게 미끄러지면서 흐르고 있는 상태를 발견하여 이를 층류의 흐름이라 하였으며, 속도가 빨라지면 유체의 입자가 서로 마구 뒤섞이고 있음을 볼 수 있었는데 이러한 유동상태를 난류라고 하였다. 그런데, 느린 속도에서 점점 유체의 속도를 증가시켜 어느 일정한 속도에 이르면 층류가 난류로 바뀔 수 있다.

레이놀드는 무차원의 함수, 즉 레이놀드수 R을 다음과 같이 정의함으로써 그의 실험결과를 종합하였다.

$$R = Vd\rho/\mu \text{ 또는 } Vd/\nu$$

V: 관속의 유체 평균속도, d: 관의 직경,
 ρ: 유체의 밀도, μ: 유체의 점성계수,
 ν: 유체의 동점성계수

관속의 유체흐름에 대한 실험치를 종합해보면 레이놀드수 R이 약 2,100보다 작은 값에서 유체는 층류로 흐르고, R이 2,100과 4,000 사이의 범위에서는 불안정하여 과도적 현상을 이루며, 다만 레이놀드수 R의 값이 4,000을 넘게 되면 대략적으로 유체의 흐름은 난류가 된다. 따라서 일반적으로 어느 유체이거나 또는 어떠한 치수의 관이거나를 막론하고 원통관의 흐름(pipe flow)에 대하여 다음과 같이 결론을 지을 수 있다.

$$R < 2,100 \rightarrow \text{층류}$$

$$2,100 < R < 4,000 \rightarrow \text{천이구역}$$

$$R > 4,000 \rightarrow \text{난류}$$

관속에서 실제유체의 흐름은 마찰에 의한 손실이 존재하는데, 곧고 긴 관에서의 손실은 실험 결과에 따라

면 속도($V^2/2g$)와 관의 길이(l)에 비례하고 관 직경(d)에는 반비례함을 알 수 있다. 이에 비례상수로서 마찰계수(f)를 사용하여 Darcy와 Weisbach는 다음과 같은 관 마찰에 의한 손실방정식을 제안하였다.

$$H_L = f \cdot (l/d) \cdot (V^2/2g) \text{ --- Eq. Darcy 방정식}$$

관 마찰문제의 차원 해석으로부터 관 마찰계수 f 는 레이놀드수와 상대적 거칠음도(조도) e/d 의 함수로 표현되며, 관의 거칠기가 크면 마찰계수가 커지고 달시방정식에 의하면 압력손실은 더욱 커진다는 것이다. 관의 거칠기는 속도를 저하시키고, 관내의 스케일은 관을 더욱 거칠게 만든다.

$$f = F(R, e/d)$$

R: 레이놀드수, e: 거칠기(roughness),
e/d: 상대적 거칠기(relative roughness)

이상과 같이 Blow line 내부의 난류 형성은 수지의 균일한 혼합에 큰 영향이 있으며, 특히 Blow line 내부 유속에 따라 난류가 될 수 있으며, 층류도 될 수 있으므로 섬유와 섬유, 섬유와 수지의 상호작용을 일으키기 위해서는 난류를 형성시켜야 한다.

4.2.2. 난류형성의 극대화

층류와 난류의 구분은 Blow line 내부 속도에 좌우되므로 내부 유속이 빠르면 레이놀드수의 증가로 난류의 유체 흐름이 일어나며, 섬유와 섬유, 섬유와 수지의 충돌이 많이 일어나 수지가 섬유에 균일하게 도포될 것이다. Blow line에서의 섬유와 수지의 농도가 낮으므로, 수지분사 후의 수지 분사방울과 섬유의 상호작용은 낮을 것이다. Blow line에서 이들의 인자 간에 일어날 수 있는 상호작용이 얼마나 효과적으로 수지와 섬유가 혼합되는지를 결정하게 된다. 대부분의 Blow line은 $0.7 \sim 2 \times 10^6$ 의 레이놀드수를 갖고 있어 고도의 난류 상태를 유지하고 있으며, 이와 같은 유동 상태의 입자들은 많은 충돌이 발생하고, 이들 충돌의 결과가 Blow line에서의 수지 혼합에 매우 중요하다.

많은 작은 수지 분사방울로 균일한 수지분포를 유지하는 방법 이외에도 커다란 수지 분사방울을 섬유와 섬유의 충돌에 의하여 균일하게 분포시킬 수 있다. 완전한 난류 흐름에서 섬유의 Blow line 내부에서의 속도는 Blow line을 통과하는 속도와 매우 무질서하게 임의의 방향으로 가는 속도의 두 가지가 있다. 이임의 방향의 속도는 Blow line을 통과하는 속도보다 훨씬 커서 약 7,800 m/sec 정도로 알려져 있다[14]. 섬유들 사이의 모든 충돌을 완전 탄성이라 가정하면 Blow line에서 섬유

의 평균 자유 이동거리(즉, 충돌거리)와 그에 따른 충돌 횟수는 기체와 같은 방법으로 계산될 수 있다[1]. Robson에[14] 의하면 Blow line 평균속도가 125 m/sec 정도에서 각각의 섬유는 약 40,000번의 충돌을 일으키며, 많은 양의 충돌은 섬유 표면에 수지를 발라주는 수지 도포 메커니즘을 제공해 주는 것이다.

레이놀드수와 난류 형성은 Blow line 내부 속도와 밀접한 관계가 있으며, 증기 속도와 수지 분사방울 크기는 Blow line에서 충돌의 결과에 매우 중요한 영향을 주기 때문에 이에 대한 접근은 일어날 수 있는 충돌의 모든 형태가 고려되어야 한다. 예를 들면 섬유와 섬유의 충돌은 응집되지 않으며, 섬유와 수지 분사방울의 충돌은 수지가 섬유 자체에 부착되는 결과를 낳는다. Chapman은 [18] Blow line에서의 충돌 결과를 Table 4와 같이 구분하여 설명을 했다.

섬유에 부착된 수지가 차후의 충돌이 수반될 경우 두 개의 섬유 사이에 bridge가 형성되며, 유동상태에서 전단력 경사가 표면장력보다 크다면 이 bridge는 깨질 것이며, 이는 수지가 두개의 입자로 나뉘지므로 수지 분포를 향상시켜 바람직한 결과를 얻을 것이다. 그러나 접촉이 그대로 유지된다면 입자는 하나의 물체로 계속 존재하여 차후의 충돌 결과물로서 나타나며, 섬유간의 수지 접촉이 보호 받게 된다. 응집체는 계속 성장하여 수지반점으로 패널에 보이는 상태까지 갈 수 있다. 이는 수지 분사방울 크기의 증가로 나타나는 수지 분사 변화에 대한 반응으로 관찰되며, 수지 분사방울의 크기 감소로 제거 가능하다. Blow line 내부 속도 증가는 전단경사를 증가시키며, 반면에 수지 분사방울 크기 증가에 따라 표면장력이 증가된다. 이와 같은 상황에서는 작은 수지 분사방울과 Blow line 속도 증가로 양호한 수지 접촉 효율성을 얻을 수 있다.

5. 결 론

MDF 공정에서의 공정최적화는 해섬공정 최적화, 수지 분사공정 최적화, 그리고 열압공정 최적화로 크게 대별되며, 해섬공정 최적화는 에너지절감과 섬유품질 최적화를 위한 것이며, 열압공정 최적화는 열압시간 단축을 통한 생산성 향상이고, 수지 분사공정 최적화는 Blow line 혼합에 대한 철저한 이해와 수지분사 공정 및 glue dosing system 최적화로 수지 사용량 절감과 수지반점을 제거하는데 그 목적이 있다.

Blow line은 현재 대부분의 MDF 공장에서 수지 도포에 사용되고 있는 것으로 초기에는 PB에 사용하였던 기계적 혼합(mechanical blending)에 의해 수지를 도포하였으나, MDF 표면에 수지반점 발생으로 이를 제거하기 위해 Blow line 혼합(Blowline blending)이 개발되어 사용하

게 되었다. 수지반점을 제거할 수는 있었지만 수지 사용량이 증가되었는데, 이는 높은 온도에 의한 수지의 조기경화로 수지의 역할 상실, Blow line과 드라이어에서 수지 손실 등에 기인한다고 알려져 있다. 따라서 본 논문은 Blow line 수지 혼합에서 수지 사용을 절감하고자 Blow line 비교 분석 및 수지분사 조건, Blow line 내부거동 등에 대한 고찰 및 분석을 실시하였으며, 이를 통하여 섬유에 수지의 균일한 분포를 얻기 위한 방법을 모색하고자 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Blow line 혼합 이론에 대한 완전한 이해와 기술적인 분석과 접근을 통하여 최적화를 위한 개선 방안을 찾아야 할 것이며, 2) 수지 분사조건 최적화를 위해 수지 분사압력과 노즐 수, 노즐 직경, 수지 분사위치 등에 관한 실험이 필요하다. 3) Blow line의 내부 거동, 즉 압력과 온도 및 유속을 측정하여 섬유와 수지의 상호작용, 섬유와 섬유의 상호작용을 해석하고 이에 따른 Blow line의 길이와 직경, 형태 등에 고찰이 필요하며, 4) 수지 분사시의 수지 분사방울 크기와 섬유의 크기를 비교하여 최적의 수지 도포를 위한 수지 분사방울 크기를 유지할 필요가 있다. 5) 수지의 접착 효율성 향상은 리파이너 작업조건에서부터 드라이어 공정에까지 행해져야 하며, 수지배합시스템 또한 최적화가 필요하다.

감사의 글

본 원고는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고 문헌

1. B. H. Flowers and E. Mendoza, Properties of matters. John Wiley and Sons, Ltd. Chichester, UK (1970).
2. O. F. Haylock, In Proceedings of 11th International Particleboard/Composite Materials Symposium. T.M. Maloney, Ed., pp. 157-177. Washington State University, Pullman, WA. (1977).
3. M. D. Gibson, *Forest Prod. J.*, **30**, 46 (1980).
4. G. Bucking, In Proceedings of 16th International Particleboard/Composite Materials Symposium. T. M. Maloney, Ed., pp. 269-276. Washington State University, Pullman, WA. (1982).
5. G. Gran, In Proceedings of 16th International Particleboard/Composite Materials Symposium. T. M. Maloney, Ed., pp. 261-267. Washington State University, Pullman, WA. (1982).
6. L. Hammock, In Proceedings of 16th International Particleboard/Composite Materials Symposium. T. M. Maloney, Ed., pp. 245-259. Washington State University, Pullman, WA. (1982).
7. J. W. Maxwell, G. Gran, and G. D. Waters, In Proceedings of 18th International Particleboard/Composite Materials Symposium. T. M. Maloney, Ed., pp. 117-143. Washington State University, Pullman, WA. (1984).
8. L. Murmanis, J. A. Yoouquist, and G. Myers. *Wood Fiber Sci.*, **18**, 369 (1986).
9. J. A. Youngquist, *Wood Fiber Sci.*, **19**, 215 (1987).
10. D. Robson, M. Riepen, J. Hague, C. Loxton, and R. Quinney. In Proceedings of 1st European Panel Products Symposium, pp. 203-210, Llandudno, Wales (1997).
11. L. A. Donaldson and T. D. Lomax. *Wood Sci. Technol.*, **23**, 371 (1989).
12. R. Frashour, In Proceedings of NPA Resin and blending seminar. J. Bradfield, Ed., pp. 62-72. National Particleboard Association. Gaithersburg, MD. (1990).
13. T. M. Maloney, Proceedings of NPA Resin and blending seminar. J. Bradfield, Ed., pp. 45-48. National Particleboard Association. Gaithersburg, MD. (1990).
14. D. Robson, In Proceedings of 25th International Particleboard/Composite Materials Symposium. T.M. Maloney, Ed., pp. 167-179. Washington State University, Pullman, WA. (1991).
15. K. Chapman, In Proceedings of CPA Resin and blending seminar. J. Bradfield, Ed., pp. 129-135. National Particleboard Association. Gaithersburg, MD. (1998).
16. C. Loxton and J. Hague. In Proceedings of 3rd Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium. pp. 392-400. Kyoto, Japan (1996).
17. D. C. Smith, In Proceedings of NPA Resin and blending seminar. J. Bradfield, Ed., pp. 71-77. National Particleboard Association. Gaithersburg, MD. (1998).
18. K. Chapman, In Proceedings of 3rd European Panel Products Symposium, pp. 164-175. Llandudno, Wales. (1999).
19. J. W. Maxwell and V. Brian. US Patent 4,514,255, (1985).