

메타 아라미드 페이퍼

강영식, 지성대, 손태원¹, 정용식², 윤석한³

웅진케미칼, ¹영남대학교, ²전북대학교, ³한국연색기술연구소

1. 서론

미국의 제지사전에 의하면 페이퍼는 섬유(식물성, 광물성, 동물성 또는 합성 펄프)를 물에 분산시켜 제조한 현탁액을 이용하여 스크린 위에서 매트 또는 펠트 모양으로 형성된 모든 종류의 시트, 즉 종이를 의미한다. 페이퍼에 사용되는 섬유는 목재 펄프, 마, 면 등의 셀룰로오스계 섬유 및 양모, 가축 등의 단백질계 섬유 등과 같은 천연섬유를 비롯하여 PET, 나일론 등의 전통적인 합성섬유와 유리섬유, 세라믹 섬유 등의 무기 섬유, 그리고 아라미드 섬유, 아라미드 펄프, 탄소섬유 등 슈퍼섬유까지 다양한 섬유의 사용이 가능하다. 합성섬유 페이퍼는 강도, 치수안정성 및 내수성이 일반 종이에 비해 매우 우수하며, 보통의 종이처럼 통기성이 있어서 널리 사용되는데, 특히 유전손실이 낮고, 흡습성이 적으며, 내열성이 높은 점으로 인해 절연재료로 각광을 받고 있다.

최근 휴대통신, 고속 정보처리 등 일렉트로닉스 기기들이 소형 경량화, 고성능화에 따른 눈부신 발전으로 인해 일상생활에 많은 부분을 차지하고 있다. 그 중에서도 소형, 경량, 고용량으로 장기 보존에 견딜 수 있고 고성능인 캐패시터 및 전지의 개발로 인해 다양한 용도전개가 가능해짐에 따라, 관련 부품 개발이 급속히 진전하고 있다. 특히 대전류를 사용하는 고전압 하에서의 충방전에 있어서 용량, 출력의 열화를 방지하는 전기 화학적 안정성이 있는 소재의 필요성이 증가하고 있다. 또한 전도성 시트를 전자기 간섭 차폐용으로 사용할 경우 시트는 종종 전자기파의 공급원으로서 작용하는 전기회로와 밀접하게 위치하거나 접촉하고 있어 전도성 시트가 전기회로와 접촉하여 전기적으로 단락되는 위험이 있다. 이러한 경우에는 화재 위험도 있어 화재 방지용 고도의 내열 및 방염 전도성 시트의 중요성이 증가하고 있다.

2. 메타아라미드 페이퍼의 용도 및 특성

메타아라미드는 amide 결합의 85%가 2개의 방향족 고리

에 직접 연결된 장쇄 polyamide로 amide 솔벤트에 m-phenylenediamine 및 isophthaloyl chloride로 제조된 고분자로 aliphatic polyamide인 나일론과는 다른 aromatic polyamide의 구조로 형성되어 있다.

이러한 원료로 제조된 메타아라미드 페이퍼는 전 세계적으로 가장 중요한 전기 절연재 중 하나로서 발전기, 변압기, 전자레인지 HVT, 휴대폰 battery pack, reactor, 자동차 spark plug leads shield, 전선피복, speaker voice coil 등에 적용되고 있으며, 또한 honeycomb panel은 항공기 tail fins/엔진나셀, 헬리콥터 블레이드 및 내장재 등과 같은 항공기 내장재,

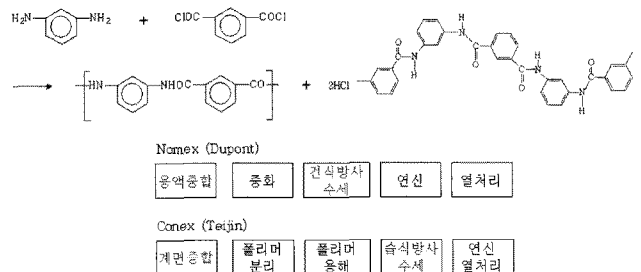


Figure 1. 메타 아라미드 제법.



Figure 2. 메타아라미드 페이퍼의 대표적인 적용 제품.

철도차량 내장재, 자동차 사시, 보트본체, 건축내장재 등에 적용되고 있다. 이들 분야는 적용 시 높은 부하와 고온이 발생하며, 냉각이 제한된 상태에서 고온 가동이 발생하는 분야로서 높은 고온 안정성과 성능을 요구하고 있어 현재까지 DuPont의 nomex 페이퍼가 표준 제품으로 자리 잡고 있다.

DuPont의 nomex 페이퍼는 절연 시 가능한 voltage 범위, 내구성 강도, lamination 여부 및 방식, paper/pressboard 밀도, paper/pressboard 두께, 흡습성 여부 및 전도성 등 고객 니즈별 특성을 달리한 다양한 제품군을 보유하고 있으며, 다음과 같은 주요 특성이 있다.

① 우수한 내전압 강도

- 레진이나 바니쉬로 더 보강하지 않고도 제품두께나 type에 따라 18 kV/mm~45 kV/mm의 단시간 전기 충격을 견딤.

② 기계적 강도

- 고밀도 제품들은 마모 및 찢김에 대한 내력이 우수하고 탄력있고 강하며 유연함.

③ 열적 안정성

- 200 °C까지의 온도에서 기계적, 전기적 특성 변화가 거의 없고, 더 높은 온도에서도 변하지 않음.
- 주요한 특성은 220 °C의 온도에서 최소 10년 동안 유지됨
- 본질적으로 솔벤트에 대한 영향을 받지 않으며, 특히 산성 및 염기성에 강함.

- 모든 종류의 접착제 및 바니쉬, 변압기 오일, 윤활유 및 냉매에 대하여도 적합한 성질을 가지고 있음.

④ 극저온에 적합한 특성

- 독특한 polymeric 구조를 가지므로 다양한 극저온 기기들에도 적합함.
- 질소의 끓는점(-196 °C)에서 실온에서의 장력보다 더 강한 장력을 가짐.

⑤ 습기에 강함

- 상대습도 95%로 평형을 이룬 상태에서 고밀도 nomex paper는 완전 건조된 제품에 대한 내전압 강도가 90% 이지만 여러 가지 기계적 특성들은 실제로 향상됨.

⑥ 방사선에 강함

- 이온화 방사선인 800 megarads(폴리에스터 결합 파괴를 일으키는)까지 영향을 받지 않으며 8시간 노출 후에도 전기적, 기계적 특성이 변하지 않음.

⑦ 방염 및 무독성

- 인간과 동물들에게 어떠한 독성도 없으며, 공기 중에서 연소되거나 녹지 않음.

다양한 nomex 제품군 중에서 가장 standard한 제품은 410 grade로 대부분의 application에 적용되고 있으며, 페이퍼 판매량의 66% 이상을 차지하고 있다. 주요 제품 Spec.은 10,

Table 1. nomex 페이퍼 제품군

Type	설명	용도
410	· 초지 공정 후에 고온, 고압으로 캘린더링하여 고밀도화 시킨 제품 · 비중 0.7~1.2까지 이며, 11가지 두께 (0.05 mm~0.76)로 제작 · 광택처리 되므로 절연 및 기계적 강도가 우수하며 탄성과 유연성을 가짐	· 모든 전기기기에 광범위하게 사용 · sheet 절연의 거의 모든 곳에 사용
411	· type 410에서 광택처리 되지 않은 제품 · 부피나 면적기준으로 type 410보다 가격이 저렴 · 5가지 두께 (0.13 mm~0.58 mm)로 제작되고 비중은 0.3 · type 410 대비 흡입성이 우수	· 전동기 상절연 및 변압기 coil end filler 같은 크기가 크고 크기를 맞추는 것이 중요한 곳에 사용
414	· 초지 공정 후에 고온, 고압으로 캘린더링하여 고밀도화 시킨 제품 · 비중 0.7~1.2까지 이며, 11가지 두께 (0.05 mm~0.76)로 제작 · 광택처리 되므로 절연 및 기계적 강도가 우수하며 탄성과 유연성을 가짐	· 전선 피복 및 수동 권선된 전동기의 slot 절연용으로 고안 되었으나 다른 곳(접어지거나 찢히어지는 곳)에도 사용됨
418	· NOMEX M 아라미드와 mica paper라 불려짐 (50%의 mica 첨가) · 5가지 두께가 있음 (0.08 mm~0.36 mm) · type 410보다 고전압에 강함	· 전동기 도체 및 코일 피복용, 그리고 변압기 및 중간 절연을 포함한 고압용
419	· type 418에서 캘린더링 하지 않은 제품 · 비중은 0.5이고 두께는 2가지 (0.18 mm와 0.33 mm)	· 크기를 맞추어야 하고 흡입성이 많이 요구되는 곳에 사용함
416	· type 416 & 464는 주로 polyester film, kepton 등과 라미네이팅	· motor slot 절연

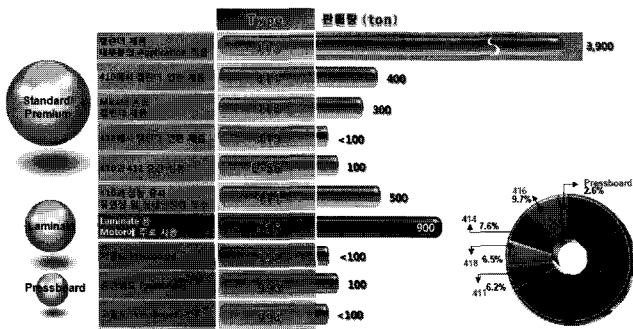


Figure 3. nomex 페이퍼의 종류 및 시장.

12, 15, 20 mil이며, 이들은 2, 3, 5 mil의 제품을 적층하여 제조하는 것으로 알려져 있다.

3. 메타아라미드 페이퍼 시장 동향

메타아라미드는 1967년 상용화 이후 수요의 다양화에 따라 제품 유형 세분화 및 application 가공 기술 고도화, 고부가가치 제품 비중확대, 물성 보완 및 강화를 위한 블렌딩 확대 등의 지속적인 기술혁신 및 application 확장을 통해 성장해왔다. 향후에도 이차전지 및 풍력 발전을 포함한 에너지 분야 수요영역확대, 기술 혁신을 통한 수송 및 건축분야의 application 확장으로 고성장이 지속될 전망이다.

미국, 중국 및 인도를 중심으로 급격한 성장이 전망되는 풍력 발전과 유럽, 북미, 아시아 지역에서 차세대 지능형 전력망의 빠른 시장 성장이 예상되는 스마트그리드, 그리고 전기자동차 등의 수요 증가에 따라 동아시아 중심의 빠른 성장이 예상되는 이차전지 등을 비롯한 수요영역의 확대는 미래 메

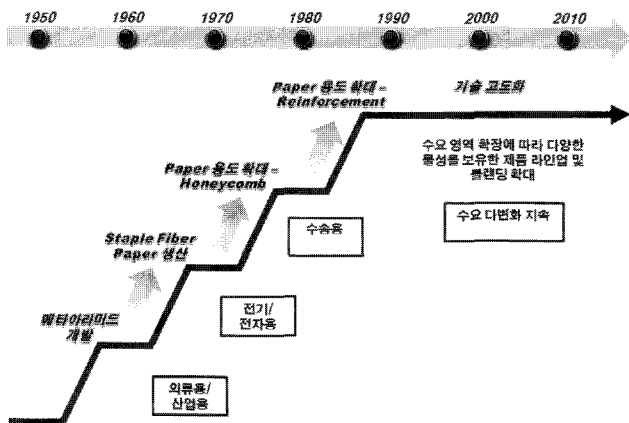


Figure 4. 메타아라미드 application 진화.

타아라미드 페이퍼 시장의 성장을 견인할 것이다.

메타아라미드의 시장 규모 현황 및 전망은 고객 인식 제고 및 수요영역 확대에 의한 용도 증가와 친환경 및 안전 관련 규제 강화, 제품 적용 기술의 발전을 통한 부가가치 수준 향상을 바탕으로 2009년 5억 달러에서 2015년 7.5억 달러 이상의 시장으로 성장할 것으로 전망된다. 용도별 시장규모는 전기 절연재는 2009년 4.4억 달러에서 2015년 6.5억 달러, 허니콤 판넬은 2009년 0.7억 달러에서 2015년 1.0억 달러로 성장할 것으로 전망된다.

메타아라미드 페이퍼는 높은 원천기술 및 가공기술 난이도와 수요산업별 공정 프로세스에 대한 노하우의 중요성으로 인해 높은 시장 진입장벽을 형성하고 있어 현재까지 DuPont이 다양한 application 영역별 다각화된 제품군을 바탕으로 독점하고 있는 시장이다. 따라서 제품을 성공적으로 개발할 경우 DuPont의 독점구조에 따른 시장의 supplier 이원화 니즈가 존재하여 신규 진입 업체에 기회 시장이다.

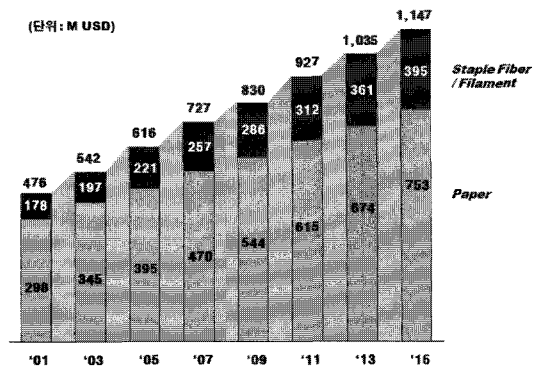


Figure 5. 메타아라미드 시장규모 현황 및 전망.

메타아라미드 페이퍼는 제품 시장의 50% 이상을 차지할 정도로 그 시장이 크지만 이의 제조를 위해서는 핵심 기초 원료인 아라미드 섬유로 만들어지는 플록과 원액으로 만들어지는 최적의 피브리드가 필요하며, 특수한 페이퍼 제조 공법이 필요하기 때문에 제품의 특허 기간이 끝난지 오래 되었는 데도 신규 생산업체가 없을 정도로 난이도가 높다. 그래서 국내뿐만 아니라 전 세계적으로도 DuPont의 제품을 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 메타아라미드 기초 원료를 직접 개발하여 페이퍼를 제조 한다면 수입 대체 및 수출 효과가 매우 클 것으로 기대된다.

메타아라미드 수급 추이는 경제 cycle, 규제환경, 안보환경의 영향을 받으며, 2008년 shortage 발생이후, 현재는 경기 침체로 일부 공급과잉 현상이 나타나고 있으나, 페이퍼는 꾸준히 수요

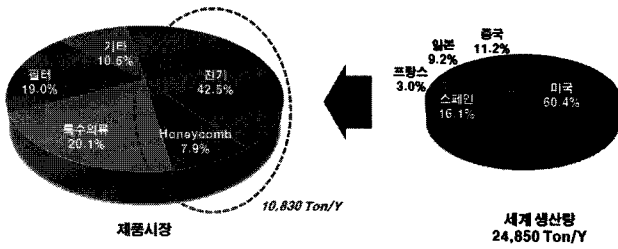


Figure 6. 메타아라미드 paper 시장분야 및 점유율.

가 증가하고 있어 공급부족이 지속될 전망이다. 따라서 가격하락을 경험하고 있는 다른 영역과는 달리 메타아라미드 페이퍼는 상대적으로 높은 가격대를 유지할 것으로 전망된다.

4. 메타아라미드 페이퍼 제조방법

4.1. 메타아라미드 페이퍼구성

메타아라미드 페이퍼는 그림에서 보는바와 같이 기계적 강도를 강하게 하는 약 6 mm 길이의 플록(floc)으로 불리는 숏컷(short cut)섬유와 절연강도를 높이고 결합인자로 작용하는 피브리드로 구성되어 있다. 피브리드는 비과립형의 섬유질 또는 필름 유사 입자로 섬유는 아니지만 웹으로 연결된 섬유 유사 영역을 갖는 섬유질로서 평균 길이는 0.2~1.0 mm이고 종횡비는 5:1~10:1이다. mica나 다른 특별한 첨가제로 만들어진 몇 가지 종류를 제외시키면 메타아라미드 페이퍼는 비아라미드 결합제나 접착제를 함유하지 않는다.

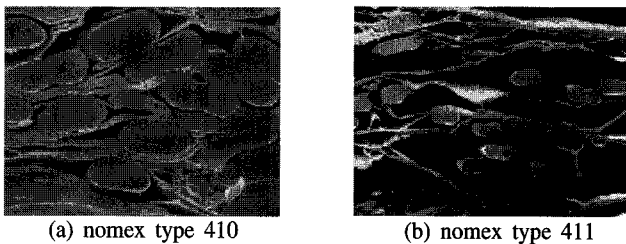


Figure 7. nomex paper 구조.

4.2. 중합

메타아라미드의 중합방법에는 계면중합(Tejjin)과 용액중합(DuPont)법이 있으며, 진공상태의 중합과 가소 용해법도 기술적으로 입증은 되었지만 실용적인 면에서 채택되지 않고 있다. 계면중합은 서로 섞이지 않는 두 개의 용제를 선택하여 피반응물인 두 개의 단량체를 각각 이들 용제에 용해시켜 혼합하여 두 개의 용액들 간에 형성된 계면에서 축합중합을

일으키는 중합방법으로 Teijin의 Conex 제품은 MPD/IPC/TPC 가 각각 100:97:3으로 공중합 하였으며 중합물은 NMP로 용해하였다. 용액중합은 각 원부재에 알맞은 용해도를 가진 용매를 선정하여 중합하는 방법으로 DuPont의 nomex 제품은 MPD와 IPC를 1:1의 몰비로 중합하였다.

우수한 고중합도의 중합물을 얻기 위해서는 MPD와 IPC의 순도와 당량비가 매우 중요하다. 특히 IPC는 수분에 의해 그림에서 보는바와 같이 mono IPC나 IPA로 변성이 되며, 이렇게 변성된 부산물들은 메타아라미드 중합 시 축중합반응을 종결시키는 인자가 되기 때문에 고중합도의 중합물을 얻을 수 없게 한다.

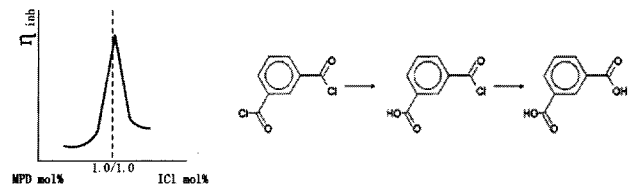


Figure 8. MPD/IPC 몰비에 따른 I.V와 I.C.I가 MIPC에서 IPA로 변화되는 과정.

또한 MPD와 IPC의 반응은 발열반응으로서 반응온도가 상당히 올라가므로 반응열제어가 매우 중요하다. 그 이유는 MPD와 IPC가 반응함으로써 HCl이 발생하게 되고 이에 의해 부산물인 Dimethylamine hydrochloride를 생성하게 되는데 이는 온도가 높을수록 가속화 되는 경향이 있으며, 또한 온도가 상승할수록 IPC가 MIPC, IPA, CIPC로의 변환이 용이해지기 때문에 side reaction이 많이 발생하게되어 고중합도의 중합물을 형성하는걸 방해하기 때문이다.

4.3. 플럭

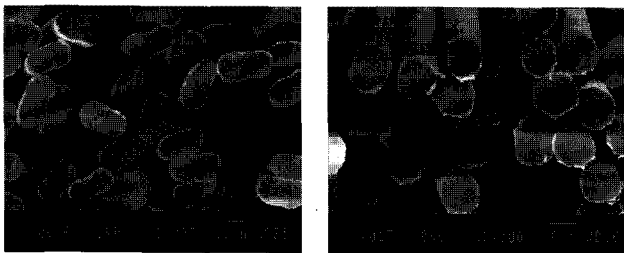
메타아라미드 페이퍼의 기계적 강도에 영향을 미치는 floc은 용액방사를 통해 제조된다. 용액방사에서 고분자의 농도는 섬유형성은 물론 섬유 물성에 중요한 요인으로 작용을 한다. 즉, 적정 고분자 농도에서 매트릭스 상으로 되어 연속상의 섬유를 얻을 수 있지만 희박농도에서는 마이크로 보이드 상으로 존재하게 되어 섬유물성이 저하될 우려가 있으며 반대로 고농도에서는 지나친 치밀화 구조에 의해 연신 공정에서 배향이 어려워 물성 개선이 어렵게 된다.

용액 방사에서 응고속은 농도구배에 의해 탈용매 현상과 응고제 침투현상이 동시에 일어나는 구간으로 부적절한 응고속 조성은 용매의 이탈흔적을 남기며 이 미세 보이드는 섬유물성의 저하를 초래한다. 따라서 메타아라미드 플럭제조에

어 응고속의 조성비와 온도에 의해 상분리 속도 완화에 의한 구조 치밀화와 결정화 속도 완화 제어가 필요하다.

플러 생산 시 DuPont은 건식방사를 하고 Teijin과 Yantai 등은 습식방사를 하고 있다. 건식방사는 고분자의 고화과정에서 가열에 의한 열전달과 용매휘발에 의한 물질전달이 동시에 일어나는 방사 공정으로 용매로는 휘발성이 좋고 증발 잠열이 작은 솔벤트가 유리하며 건조기체로는 공기, 비활성 기체, 초가열된 증기 등이 사용된다. 용매 휘발용 기체는 통상 사조에 대하여 역류하도록 되어 있으나 고분자의 특성에 따라 순류가 섬유유 균제도 향상에 도움이 되기도 한다. 습식방사는 점성이 있는 고분자 용액을 고분자 용매와 혼합성이 있는 비용매에 방사하여 응고액 중에서 겔화되어 섬유화가 진행된다.

일반적으로 습식방사는 방사속도가 건식방사 보다 훨씬 느리지만, 방사구의 수를 많이 할 수 있고 후처리 공정을 연속적으로 할 수 있는 이점을 가지고 있으나, 단면의 형태 및 직경이 균일한 섬유를 제조하기 위해 응고액 중의 용매농도를 엄밀히 관리해야만 한다. 만일 농도가 떨어지면 응고가 빨라지게 되어 섬유를 피복하는 외피가 형성되면서 용매의 확산을 방해하기 때문이다.



건식방사 단면 습식방사 단면

Figure 9. 방사방법에 따른 메타아라미드 섬유의 단면.

4.4. 피브리드

페이퍼 제조에 있어서 고도로 피브리드화된 펄프는 높은 가요성, 종이에서의 높은 결합능 및 우수한 다공도 등의 매우 유용한 특성을 부여하는데, 메타아라미드는 피브리드형성이 어려운 특성을 가지고 있어 피브리드를 제조해야만 한다. 피브리드는 fiber-film hybrid에서 나온 단어이며 형태는 가공조건에 따라 매우 다양하다. 이러한 가공 조건은 피브리드를 foam 형태부터 섬유질이 많은 입자 등의 다양한 형태와 유변학적 모폴로지를 이끌어내기 때문에 피브리드 제조 조건을 어떻게 선정하느냐가 페이퍼 물성에 매우 중요한 영향을 미친다. 따라서 Figure 10에서 보는 바와 같이 피브리드의 형태를 대상

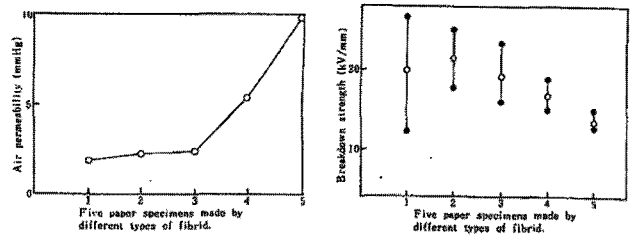


Figure 10. 피브리드 형태에 따른 공기투과도 및 전기적 특성의 변화.

으로 하는 절연지에 따라 요구되는 절연 파괴강도가 균형을 잡도록 제조된다.

하지만 일반적으로 피브리드의 평균 길이는 0.8 mm 이하의 범위가 바람직하나 1 mm를 초과할 경우 페이퍼의 흡액성이 저하하고 부분적인 미함침이 발생하여 전기·전자 제품의 내부저항을 상승시킬 우려가 있으며, 또한 유변학적 모폴로지에서도 피브리드의 여수도를 측정 시 여수도가 너무 높으면 페이퍼의 강도가 저하되고 반대로 너무 낮으면 지나친 피브리드의 미세화로 인해 결합제 기능이 저하될 가능성이 있다. 이러한 피브리드를 제조하는 방법은 폴리머 특성에 따라 고해법, 고 선단 역침전법 및 플래쉬 방사법 등이 있다. 메타아라미드에 주로 사용되는 고 선단력 침전법은 폴리머 용액을 응고액 중에 유입하여 응고액과의 접촉 시 물질이동과 침투이론에 의해 제조된다.

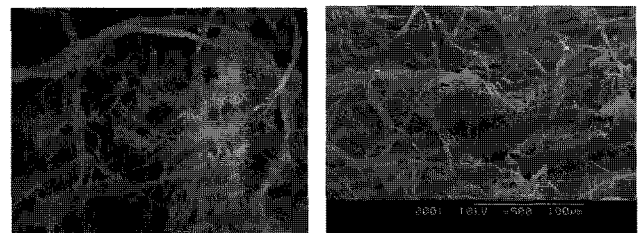


Figure 11. 피브리드 현미경 사진 및 SEM 사진.

Table 2. 피브리드와 플러의 열적 특성

구분	Tg (°C)	Tm (°C)
FIBRID	268	415
FIBER	275	430

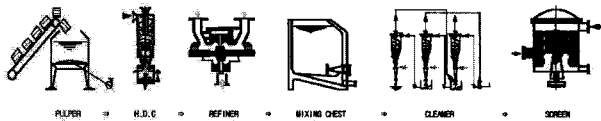
Tg and Tm of fibrid and fiber of aramid

4.5. 제지 공정

메타아라미드 제지 공정은 일반 제지 공정과 동일하게 지료 조성 공정, 초지 공정, 도공 공정, 완정 공정을 거친다. 지료 조성 공정은 초지기에 지료를 보내기 직전의 공정으로 여

기서 종이의 기본적인 품질 특성이 결정되며, 주원료인 펄프는 이해 및 고해 과정과 충전제를 비롯한 각종 약품을 배합하는 과정을 거친 다음, 클리너와 스크린 등에서 정선, 제진 과정을 거쳐 초지기의 헤드박스로 보내진다. 초지 공정은 지료를 탈수 건조하여 종이를 초조하는 공정으로 지층형성, 압착 탈수, 건조, 광택부여 등의 과정으로 이루어지며 헤드박스에서 분출된 지료는 와이어 파트에서 지필로 형성된 다음 프레스 파트에서 압착 탈수와 지필 표면을 평활하게 하는 과정을 거치게 되며, 이어 드라이어 파트에서 잔류 수분을 증발시킨 다음 캘린더에서 종이의 표면 평활성과 두께가 조절된

STOCK PREPARATION PROCESS



PAPERMAKING PROCESS

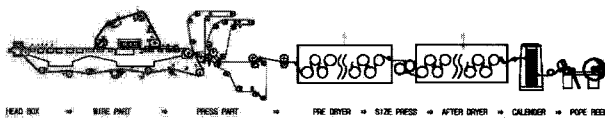


Figure 12. paper 제조 공정.

다. 도공 공정은 메타아라미드 페이퍼 제조 공정 중 가장 핵심공정으로 슈퍼 캘린더 공정을 통해 표면 평활성 및 밀도 제어가 가능한 공정이다. 끝으로 완성 공정은 제품을 slitting, cutting, sorting한 후 포장하는 공정이다.

이와 같이 일반 제지 공정과 동일한 공정을 거치게 되지만 플러의 특성상 펄프화 공정에서 엉킴 현상 및 문제점이 발생하기 쉬우며, 슬러리의 농도가 일반 펄프 대비 매우 낮아야 하기 때문에 저장 공정에서 주의를 해야하며, 고풍량의 페이퍼 제조 시 유량이 너무 많아져서 헤드박스의 오픈케도를 많이 열어야 하는데 이로 인해 문제 발생 가능성이 있다. 또한 절연지로 가장 많이 사용되고 있는 DuPont의 nomex T410 제품을 제조하기 위해서는 성형과 광택을 위한 슈퍼 칼렌더가 필요하나 일반 제지 공정에서 사용되어지는 대부분의 슈퍼 칼렌더는 온도가 110 °C~180 °C 정도이며, 그 용도 또한 평활성 및 광택 부여가 주목적이다. 하지만 메타아라미드 페이퍼에 필요한 슈퍼 칼렌더는 적용 온도가 300 °C 이상, 전압이 300 kN/cm 이상이 되어야 한다.

5. 결론

메타아라미드 페이퍼 시장은 매우 보수적일 뿐만 아니라 DuPont의 nomex 페이퍼가 표준 규격화 되어 있기 때문에 전 세계적으로 nomex 페이퍼와 유사한 제품을 개발하기 위한 업체가 수없이 많았으나 모두 실패하였다. 이러한 이유로 제품 특허 기간이 만료 된지 오래 되었음에도 불구하고 신규 업체가 없는 것이 nomex 페이퍼 제품 개발의 난이도에 대한 증거이기도 하다. 하지만 국내의 경우 제지 및 합성지 기술이 발달되어 있고 섬유 업체들의 우수한 기술력을 바탕으로 하여 이러한 문제점들을 충분히 극복하고 새로운 제품을 개발할 수 있을 것이라 생각된다.

참고문헌

1. Handbook of Fiber Science and Technology : Volume III, 1993.
2. Keith Johnson, Synthetic Paper from Synthetic Fibers, 1971.
3. Menachem Lewin, Handbook of Fiber Chemistry.
4. J. Corbiere, Fundamental Aspects of Solution Dry-Spinning.
5. LeRoy K. McCune, Symposium on High-Temperature Fibers, 1962.
6. Akira Miyoshi, Development of Heat Resistant Synthetic Papers for Electrical Insulation, 1982.
7. Karyakin, N.V, Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 1983.
8. USP 3094511.
9. USP 3063966.

· 강영식

2000. 전북대학교 섬유공학과 졸업
 2002. 전북대학교 섬유공학과(석사)
 2002. 휴비스 연구소
 2008-현재, 웅진케미칼(주) 기술연구소

· 지성대

1981. 고려대학교 화학과 졸업
 1992. 고려대학교 화학과(박사)
 2005. 코오롱 연구소
 2007. (주)새한 광학소재사업팀장
 2009-현재, 웅진케미칼(주) 기술연구소장

· 손태원

1976. 서울대학교 섬유공학과 졸업
 1984. 서울대학교 섬유공학(박사)
 1982-1994. 한국과학기술연구원 책임 연구원
 1994-현재, 영남대학교 섬유패션학부 교수

· 정용식

1994. 한양대학교 섬유공학과 졸업
 1999. 한양대학교 섬유공학과(박사)
 2001-현재, 전북대학교 섬유소재시스템공학과 교수

· 윤석한

1998. 경북대학교 염색공학과 졸업
 2004. 경북대학교 일반대학원 염색공학과(박사)
 2004-현재, 한국염색기술연구소 연구개발본부 본부장