

토너카트리지 OPC 드럼용 AI 튜브의 응력 및 변형거동에 관한 연구

김 청 균[†]

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

A Study on the Stress and Displacement Behaviors of an aluminum Tube in OPC Toner Cartridge

Chung Kyun Kim[†]

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – The stress and displacement behavior analysis of an aluminum tube for an organic photo conductor drum has been presented using a finite element analysis technique by non-linear FEM program. The maximum displacement in the radial direction of OPC drum may directly affect to the quality of printed matter. Thus, the deformed profile of the aluminum tubes should be limited depending on the toner powder size and the contact rolling forces between an OPC drum and a paper. This paper recommends the critical loading of 400 Pa for the provided toner size, 8 μm for excellent printed matters and long life of the toner cartridge.

Key words – Toner, Organic photo conductor, aluminum tube, Stress, Strain, FEM.

1. 서 론

레이저빔 프린터(Laser Beam Printer)를 비롯한 디지털 복사기는 흑백 또는 컬러를 출력할 수 있는 토너카트리지를 사용하여 종이에 인쇄한다. 카트리지는 고체토너를 공급하는 토너용기, 컴퓨터의 LSU(Laser Scanning Unit)에서 레이저빔에 의해 전송된 영상정보를 받아 종이에 인쇄해 주는 OPC(Organic Photo Conductor) 드럼, OPC에 붙어있던 토너가루를 공급된 종이에 전사하여 글자체, 그림, 도형 등 각종 이미지를 안정되게 정착하기 위한 가열장치, 그리고 종이를 이송하기 위한 구동장치는 하나의 세트 조립되어 있다. 토너카트리지는 소모성 부품이기 때문에 프린터의 본체와는 탈·부착이 용이하도록 제작된다.

OPC 드럼은 카메라의 필름과 같은 역할을 하는 것으로 컴퓨터의 LSU 정보를 OPC 드럼(알루미늄 튜브에 기 능성 박막을 코팅하여 제조된 원통) 표면에 공급된 레이저빔에 반응하여 인쇄형상을 잡고 대전에 의해 토너용기로부터 뿌려지는 토너가루를 드럼표면에 인쇄형상으로 묻

혔다가 OPC 드럼 아래로 공급된 종이에 전사하여 글씨나 그림을 복제해내는 디지털 사무용기기의 핵심부품이다. OPC 드럼에 관련된 핵심기술의 대부분은 특허로 보호되어 있으므로 쉽게 넘나보기 어려운 고급기술이다. IT관련 사무용기기 제품은 2000년대에 들어오면서 프린터와 복사기 관련 토너카트리지 수요가 폭발적으로 늘어났고, 미국의 HP와 일본의 Canon을 비롯한 약 15개사와, 한국의 삼성전자 등이 국내의 시장에서 가격 및 품질경쟁을 벌이고 있다.

토너카트리지는 파우더가 모두 소비되거나 또는 OPC 드럼의 코팅박막이 종이와의 상대접촉 구름마찰 운동을 하면서 마모나 결함이 발생하면 인쇄물의 품질을 떨어뜨 리므로 카트리지 자체를 교환해야 하는 고가의 소모품이다. 정품 토너카트리지는 약 20,000장의 A4용지를 출력하면 토너가 모두 소모되므로 전체를 교환해야 한다. 최근에 자원절약 차원에서 이미 사용한 카트리지를 회수하여 토너를 재충전하여 1~2회 더 사용할 수 있는 재생 카트리지를 사용하고 있으나, OPC 드럼 코팅부 손상에 의해 인쇄 품질은 많이 떨어진다.

OPC 드럼의 박막코팅 표면이 종이와 상대접촉 구름마

[†]주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

찰 작용을 하면서 스크래치 마모가 발생하고, 또한 파우더나 먼지, 특히 스테이플러와 같은 이물질이 종이에 함께 유입되면서 CGL 코팅박막이 손상을 입으면 OPC 드럼은 더 이상 양질의 인쇄물을 출력할 수 없어 카트리지를 교체해야 한다. 보통 프린터 제조 메이커에서 출시한 정품 토너카트리지를 사용한 출력물의 인쇄품질은 우수하지만, 재생품 카트리지를 사용하면 정품대비 80~90%로 품질이 많이 떨어지기 때문에 재생품 사용에는 한계가 있다. 더 큰 문제는 일본의 캐논사에서 한국의 삼성전기와 파켄OPC를 상대로 특허소송을 걸어 승소한 사례 [1]가 있기 때문에 정부 보조금에 의한 재생카트리징 시장의 활성화는 현실적으로 어려워졌다.

OPC 드럼의 박막표면에 존재하는 결함을 찾아내기 위한 자동검사[2], 종이의 안전한 자동급지에 관한 연구 [3,4] 등에 대한 연구를 진행하기는 하였지만, 종이가 통과하는 OPC 드럼과 전사기 롤러 사이의 구름 마찰력에 의해 발생하는 AI 튜브의 응력 및 변형거동에 관한 기초 연구는 아직 진행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 OPC 드럼의 핵심부품으로 공급되는 AI 튜브의 강도안전성을 유한요소법으로 해석하고자 한다. AI 튜브의 강도를 토너입자의 크기 이내로 유지할 수 있는 최적의 조건으로 확보하지 못하면 대전된 토너가루가 종이에 정확하게 전사되지 못하기 때문에 글자나 그림의 인쇄 품질은 떨어지고, 드럼의 회전과정에서 불완전한 구름마찰 접촉조건으로 인해 코팅박막은 편마멸이 진행될 우려가 높다.

2. OPC 튜브

AI 튜브는 토너카트리지의 OPC 드럼에 장착되어 레이저법 프린터, 디지털 복사기 등에 사용되는 원통형 소재로 기계적 강도와 표면 가공정밀도가 우수해야 기능성 코팅이 잘 진행될 수 있다. 따라서 OPC 드럼 제조사는 알루미늄 튜브에 대한 정밀가공기술, 최적강도와 경량화에 많은 관심을 갖고 있다.

AI 튜브는 충분한 강도를 유지하면서 정밀한 표면을 유지해야 우수한 CGL 코팅박막을 형성할 수 있어 형상복제가 용이하고, 원통표면에 어떠한 스크래치 결함도 허용되지 않는다. AI 튜브의 길이를 정밀하게 절단하거나 연삭가공 과정에서 형성된 마모나 결함발생은 알루미늄 튜브의 불량으로 간주되기 때문에 치수정밀도 확보는 대단히 중요하다. AI 튜브는 공급된 종이의 상대접촉 구름 마찰 운동을 하면서 튜브 표면에 잠시 붙어 있는 토너가루를 종이에 완벽하게 전사하여 정착시켜야 하기 때문에 대단히 우수한 진원도를 유지하면서 접촉면압을 균일하

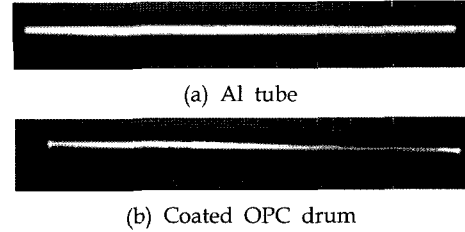


Fig. 1. Aluminum tube and coated OPC drum.

게 분포시켜야 인쇄물의 품질이 우수해진다. 이 과정에서 튜브의 강도안전과 최적설계 조건을 도출하여 AI 튜브의 경량화를 추구함으로써 튜브의 고품질화 및 수명·강도 내구성을 유지할 수 있다.

Fig. 1은 코팅 이전의 기계가공 알루미늄 튜브와 AI 원통면에 녹색(또는 청색, 적색 등)으로 코팅한 OPC 드럼을 각각 보여주고 있다. 보통 AI 튜브의 직경은 24.5~35 mm의 원통형으로 제작되고, 길이는 공급되는 종이의 사이즈(A4, B5 등)에 맞추어 결정한다.

3. 유한요소해석

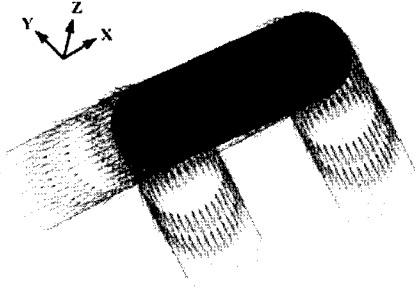
3-1. AI의 크기와 소재

응력 및 변형거동 해석에 사용된 AI 튜브의 두께는 대단히 얇고, 원통형의 긴 실린더 형상을 하고 있다. 프린터나 복사기에 사용되는 AI 합금소재 3003 계열의 인장항복강도는 145 MPa, 탄성계수는 68.9 GPa, 포아송수는 0.33을 갖는다.

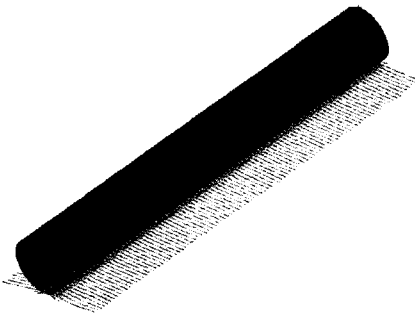
OPC 드럼용 AI 합금소재는 KS D 6761 “이음매 없는 알루미늄 및 알루미늄 합금관”에 대한 규격으로 제시되어 있고, 알루미늄 튜브는 KS 규격에 의해 AI 3003TD 보통급의 인발관으로 규정되어 있다[5]. AI 합금의 질별은 KS D 0004에서 H14, 즉 AI 튜브의 기계적 성질은 별도의 열처리를 하지 않고도 가공경화만으로 확보할 수 있으며, 인장강도가 O와 HX8의 중간 질별을 나타낸다[6]. 본 연구에서 사용한 알루미늄 튜브 합금에 대한 물리적 특성을 Table 1에서 제시하였다.

Table 1. Material properties of an aluminum tube

Mechanical Properties	Al 2017-O	Al 3003-H14
Modulus of Elasticity, GPa	72.4	68.9
Poisson's Ratio	0.33	0.33
Density, kg/m ³	2730	2730
Tensile Yield Strength, MPa	68.9	145



(a) Fixing axial displacements and rotations



(b) Uniformly distributed loadings

Fig. 2. FE analysis meshes and boundary conditions for an organic photo conductor.

3-2. 유한요소 해석모델

Fig. 1에서 보여준 OPC 드럼의 양쪽은 플라스틱 기어에 의해 지지·구동되므로 Fig. 2(a)와 같이 축방향의 변위량은 없고, 드럼의 회전 비틀림 모멘트가 형성되지 않는다고 가정할 수 있다. Al 튜브의 강도안전성을 해석하기 위해 Fig. 2(b)에서 제시한 것처럼 축방향을 따라서 Al 튜브와 공급된 종이 사이에는 균일한 하중(edge load)이 작용한다고 가정한다.

본 연구에서 사용한 비선형 유한요소해석 프로그램은 MSC/MARC[7]이고, FEM 해석에 사용한 모델은 박막셀(thin shell), 축대칭 4각 요소를 사용하였다. 박막의 셀 구조를 하고 있는 알루미늄 튜브의 응력과 변형거동을 해석하기 위해 5,400개의 FEM 메쉬로 나누었다.

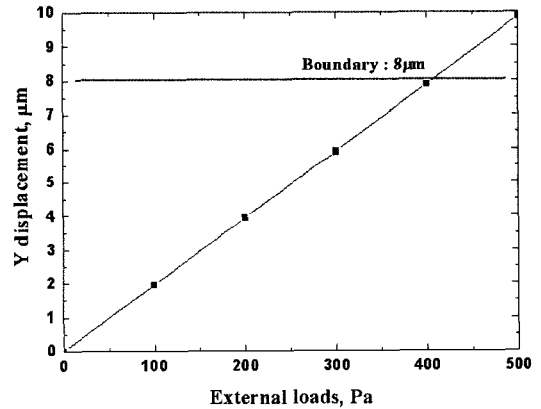
4. 해석결과 및 고찰

4-1. 외부작용 임계하중

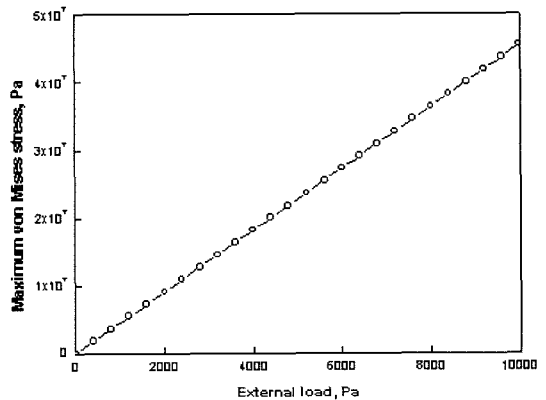
토너입자 크기는 평균적으로 8 μm이고, OPC 드럼의 코팅막은 수 μm에서 최대 40 μm의 두께로 코팅된다. 따라서 OPC 드럼의 외경에 8 μm 정도의 토너입자가 더

코팅된 것처럼 존재한다고 가정할 경우, 드럼은 이송된 종이의 구름마찰 접촉운동을 하면서 대전(electrification)에 의해 전상되면서 인쇄는 안전하게 이루어진다. 따라서 Al 튜브에 가해지는 균일한 하중은 반경방향으로 최대 8 μm을 벗어나지 않도록 관리해야 양질의 인쇄물을 출력할 수 있다.

결국 OPC 드럼의 기계적 강도를 보장하는 Al 튜브의 변형거동은 최대 8 μm 이하에서 운영될 수 있도록 외부 하중을 억제하는 설계기술이 필요하다. Fig. 1에서 제시한 OPC 드럼을 강체라 가정하고, 반경방향의 최대 변위량이 8 μm 이내에서 작동하는 하중조건을 해석한 결과를 Figs. 3, 4 및 6에서 제시하고 있다. FEM 해석결과에 의하면, OPC 드럼용 알루미늄 튜브를 구동하는 플라스틱 기어 메커니즘에 의한 하중지지가 너무 높게 설정된다면 인쇄물의 품질이 떨어지는 문제점이 예상된다. 따라서 Fig. 3(a)에서 제시한 임계하중의 제한조건은 실제의



(a) Displacement in the radial direction



(b) Maximum von Mises stress

Fig. 3. Displacement in Y-direction and maximum von Mises stress for an aluminum 3003 OPC tube as functions of external loads.

OPC 드림 설계에서 중요하게 다루어져야 하는 해석 데이터이다. Fig. 3(b)는 AI 튜브에 안전하게 거동할 수 있는 접촉면압 400 Pa를 포함하여 최대 10 kPa까지 가한 상태에서 von Mises 최대응력을 해석한 결과를 보여준다. FEM 해석결과에 의하면, 토너입자 크기를 고려한 임계 하중 작동조건에 대한 해석결과와는 다르게 AI 구조물에 걸리는 응력은 강도 안전성이 탄성한계 이내에서 작동하고 있음을 보여준다. 즉, AI 튜브의 강도측면에서 안전성은 전혀 문제가 없다는 것이다.

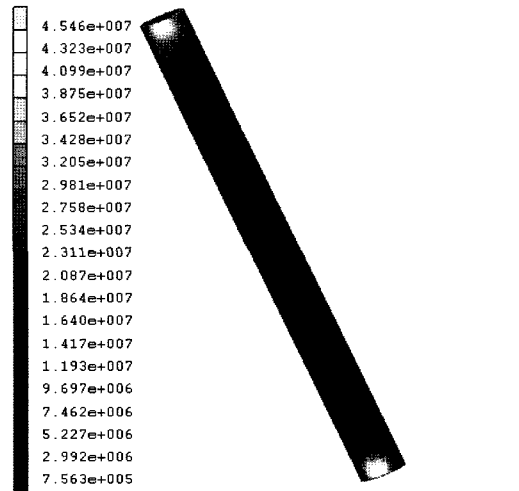
4-2. 응력 및 변형거동

토너 카트리지의 OPC 드림용으로 사용하는 알루미늄 튜브의 기계적 강도를 고찰하기 위해 Fig. 2에서 보여준 긴 실린더 형상의 해석모델에 균일한 하중을 작용할 경우 발생하는 대표적인 접촉응력과 변형률 거동특성을 Figs. 4와 6에서 보여주고 있다.

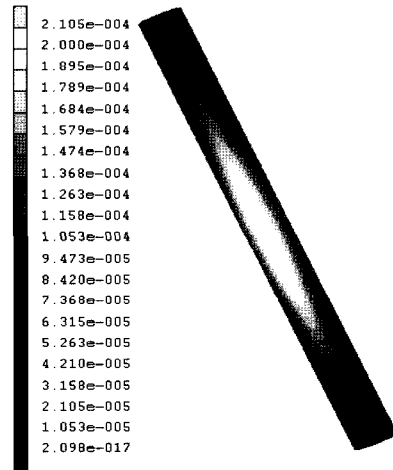
Fig. 4는 AI 2017-O 튜브의 두께가 0.75 mm이고, 길이가 330 mm이며, 실린더의 축방향을 따라서 가해진 균일하중이 10 kPa일 경우에 대한 응력과 변형거동을 FEM으로 계산한 결과이다. 이 때에 회전축의 양쪽은 플라스틱 기어에 의해 고정되어 축방향의 변위양은 없고, 튜브가 회전함에 따라 발생하는 비틀림 모멘트는 발생되지 않는 것으로 가정한다. 이것은 레이저 프린터의 종이저장 트레이(paper tray)에서 이송된 종이가 OPC 드림을 통과하면서 드림의 코팅표면에 이미지 형태로 붙어있던 대전 글자체 토너가루가 종이에 전사되면서 작은 접촉면압을 받게 된다. 또한 토너 호퍼에서 대전현상에 의해 토너롤러의 표면에 토너가루를 균일하게 붙여서 OPC 드림의 표면에 전송하는 과정에서 항상 구름마찰 접촉운동을 한다. 따라서 OPC 드림은 하부의 종이 이송하는 과정에, 그리고 토너롤러의 토너가루를 전송하는 과정에 구름마찰 접촉운동을 하기 때문에 접촉하중에 의한 응력 및 변형량이 발생한다. 이것은 AI 튜브의 강도에 영향을 미치는 것은 물론이고, 특히 종이에 인쇄되는 글자, 그림 등의 인쇄 품질을 좌우한다. 따라서 알루미늄 튜브에 작용하는 하중에 의한 응력해석과 변형률 분포 해석은 대단히 중요하다.

Fig. 4에서 제시한 응력과 변형량에 대한 FEM 해석결과에 의하면, von Mises 응력은 플라스틱 기어에 의해 고정된 양쪽 끝단에서 높은 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다. 이 때의 von Mises 최대응력은 45.5 MPa로 높지만, AI의 항복응력 72.4 MPa의 62.8% 수준으로 강도 안전성은 우수하다할 수 있다.

반면에 반경방향의 변형률 분포를 보여준 Fig. 4(b)의 해석결과에 의하면, 최대 변형량은 튜브의 중앙부에서 발



(a) Von Mises stress distribution



(b) Radial displacement distribution

Fig. 4. Von Mises stress and radial displacement distributions for a tube thickness 0.75 mm, a tube length 330 mm, and a rolling contact pressure 10 kPa.

생된다. 즉, AI 튜브의 반경방향 변형은 중앙부에서 크게 발생한다는 것으로 튜브의 구름마찰 접촉력에 의해 기어를 장착한 좌우측보다는 중앙부에서 전사된 토너가루의 이미지 형상이 손상을 받을 가능성이 높을 것이라는 추론이 가능하다. Fig. 4(b)에서 계산된 최대 변형량은 0.21 mm로 튜브 전체의 축방향 길이를 따라서 계측된 변형량이 상대적으로 높기 때문에 글씨, 그림 등이 불안정하게 인쇄될 가능성이 높다. 이 값은 토너입자의 평균크기를 나타내는 8 μm에 비하여 대단히 높은 값으로 OPC 드림 표면의 마모가 발생할 우려가 많다.

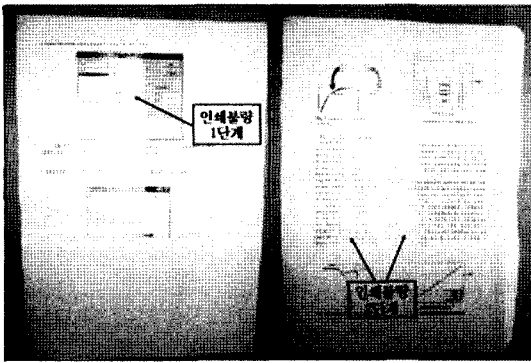
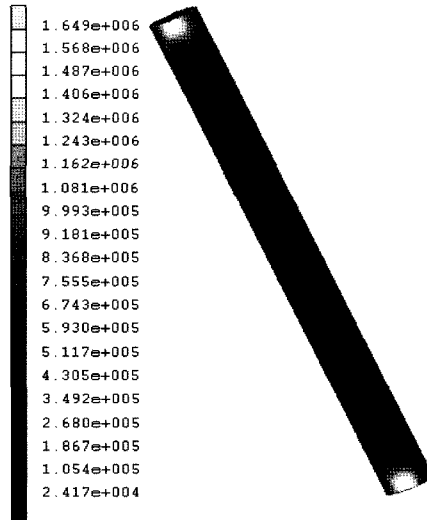


Fig. 5. Unqualified printed paper when a toner powder is depleted.

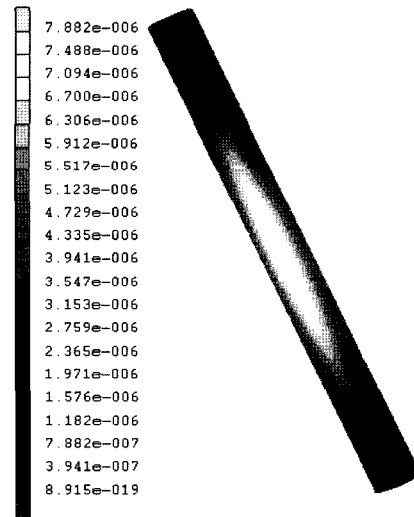
토너가 거의 소모되어 인쇄가 잘 안된 사례를 제시한 Fig. 5의 결과를 보면, 중앙부에서 가장 먼저 불량 인쇄가 발생하고, 지속적으로 토너가 고갈되면 중앙부에서 좌측으로 넓어지면서 인쇄품질이 떨어지고 있다. 결국 알루미늄 튜브의 변형거동 특성은 토너가 충분하고 코팅막의 대전효율이 우수할 경우는 큰 문제가 없으나 코팅막이 마모에 의해 얇아지고, 토너가 떨어지면 인쇄물의 품질은 특히 중앙부에서 급격하게 떨어진다는 사실을 반증하는 실험 데이터라 생각된다.

Fig. 4(b)에서 제시한 튜브의 증상은 양쪽 측면보다 높은 변형양이 발생하는데, 이것은 레이저 프린터 인쇄물의 품질과 직결되고, 특히 OPC 드럼의 표면에 코팅 박막층에 대한 마찰력 증가로 이어질 것이다. 이처럼 국부적으로 발생한 불균일 변위량은 OPC 드럼에 극미한 마모를 유발하여 OPC 드럼의 수명을 단축하는 원인으로 작용한다. 그 결과로 OPC 드럼을 재생하여 사용할 경우 인쇄물의 품질은 많이 떨어질 것이라는 추론이 가능하다. 실제로 재생토너를 사용할 경우 인쇄품질은 정품대비 80~90%인 것으로 알려져 있다.

Fig. 6에서 보여준 해석결과는 Fig. 4의 경우와 동일한 형상을 갖지만 소재는 AI 3003-H14로 KS 규격에서 인접한 소재를 사용하였다. 여기서 사용한 AI 튜브의 직경은 30 mm, 두께는 0.8 mm, 길이는 330 mm으로 앞에서 제시한 해석모델보다는 약간 두꺼운 형상을 하고 있다. 반면에 공급된 종이와 드럼 사이에 작용하는 구름마찰 접촉력은 400 Pa, 즉 Fig. 3(a)에서 계산한 임계면압을 가한 상태에서 접촉응력과 변형량 분포도를 해석하였다. von Mises 응력과 변형량 분포에 대한 해석결과를 보면, 플라스틱 기어로 고정된 끝단에서 von Mises 최대응력 1.6 MPa가 작용하고 있음을 알 수 있다. 이것은 AI 소재의 탄성변형 거동한계에서 작용하는 것으로 대단히 안전



(a) Von Mises stress distribution



(b) Radial displacement distribution

Fig. 6. Von Mises stress and radial displacement distributions for a tube thickness 0.94 mm, a tube length 330 mm, and a rolling contact pressure 400 Pa.

한 결과이다. 또한 튜브에 작용하는 반경방향의 최대 변형량 7.8 μm은 실린더의 중앙에서 발생하지만, 토너입자 크기로 제시하였던 8 μm보다 작기 때문에 탄성거동 특성은 안전한 것으로 판단된다. 결국 공급된 종이에 의해 OPC 드럼에 가해지는 구름마찰 하중조건이 낮을수록 레이저 프린터에 의한 인쇄물의 품질은 대단히 우수해질 것이라는 사실이다.

요약하면, 카트리지에 공급된 종이에 의해 OPC 드럼에

가해지는 구름마찰 하중조건이 낮으면 낮을수록 레이저 프린터에 의한 인쇄물의 품질은 대단히 우수해질 것이라는 사실이다. 즉, OPC 드럼에 작용하는 구름마찰 작용력은 가능한 작게 걸리도록 공급된 종이와 드럼 사이의 간극을 최적의 작동조건으로 설계하는 것이 중요하다. 또한, OPC 드럼의 양측면에 설치한 플라스틱 기어의 정확한 회전과, 알루미늄 튜브의 두께, 직경, 전체 길이는 강도 안전성을 보장할 수 있는 최적설계 작동조건을 찾아서 제작하는 것이 레이저 프린터의 인쇄품질, OPC 드럼의 내구성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 레이저 프린터의 핵심부품인 OPC 드럼용 AI 튜브에 대한 응력과 변형거동을 토너입자의 크기와 임계하중, 마모발생에 따른 인쇄물의 안전성에 대하여 고찰하였다.

AI 튜브에 걸리는 응력과 변형량 해석결과에 의하면, 레이저 프린터의 인쇄물에 대한 품질은 OPC 드럼의 기계적 강도를 보장하는 알루미늄 튜브의 강도안전이 중요한 영향을 미친다는 사실을 보여주고 있다. 결국 OPC 드럼의 코팅마찰에 대한 마찰과 마모현상은 AI 튜브에 가해지는 작동하중에 의해 크게 영향을 받기 때문에 마모가 발생하지 않고 우수한 인쇄물을 출력할 수 있는 토

너입자의 크기 $8\ \mu\text{m}$ 와 임계하중 $400\ \text{Pa}$ 에 대한 응력과 변형거동에 대한 FEM 해석결과를 제시하였다.

결국 토너카트리지의 OPC 드럼에 작용하는 구름마찰 작용력은 가능한 작게 걸리도록 종이와 드럼 사이의 간극을 최적의 작동조건, 즉 구름마찰 하중조건이 낮게 유지하면 인쇄물의 품질은 대단히 우수해질 것이라는 사실이다.

참고 문헌

1. 김재영, “0캐논 특허권 승소,” 동아일보, Oct. 14, 2006.
2. 박병준, 한광수, 최준수, 신은석, “OPC 드럼 표면 자동 시각검사 시스템 구현,” 한국컴퓨터종합학술대회, 2005 논문집, Vol. 32, No. 1(B), 2005.
3. 구도현, 한순홍, “프린터의 급지기구 설계 전문가 시스템,” KMIS '94 추계학술대회 논문집, 1994.
4. Mittal, S. and Dym, C. L., “PRIDE: An Expert System for the Design of Paper Handling Systems,” IEEE Computer, Vol. 19, July 1986.
5. “이음매 없는 알루미늄 및 알루미늄합금 관 KS D 6761,” 한국표준협회, 2002.
6. “알루미늄, 마그네슘 및 그 합금-질별 기호,” 한국표준협회, 2006.
7. “MARC Analysis,” Version K7.3, 1999.