

동적 거동 시뮬레이션을 위한 종이의 물성치 추정

이근표[#], 최진환^{*}, 이순걸^{*}

Material Property Estimation of Paper for Dynamic Behavior Simulation

Geun Pyo Lee[#], Jin Hwan Choi^{*} and Soon-Geul Lee^{*}

ABSTRACT

This study proposes a technique to estimate the material property of a paper by using an experimental methods and commercial CAE software. Under gravitation, if one side of the paper is attached to the ground, the opposite side of paper is largely deformed, and vibrates freely. Since the paper has an orthotropic characteristic due to its treatment, the deformations in two orthogonal directions of the dry paper are different. An experimental method to measure the static deformation of the paper introduces this phenomenon. And dynamic behavior, frequency of free vibration is measured. And then, virtual prototypes that can represent the static and dynamic behavior are modeled by using the commercial CAE software RecurDynTM/MTT3D, which has been widely used by the printer makers. While comparing the deformation and frequency from the experiment and simulation, a design optimization technique in the commercial CAE software of R-INOPL, RecurDynTM/AutoDesign is used to estimate the material property such as Young's modulus, shear modulus and density of the paper.

Key Words : Static Deformation (정적 처짐), Material Property Estimation (물성치 추정), Design Optimization (최적설계), MTS (Media Transport System: 미디어 이송 장치)

1. 서론

기구학적 메커니즘과 제어 알고리즘을 이용해서 종이나 지폐와 같은 유연하고 얇은 판을 지정된 경로를 통해 이송하는 장치를 미디어 이송 시스템(Media Transport System ; MTS)이라고 하는데, 그 종류에는 프린터 및 복사기, 팩시밀리, ATM 등이 있다. 요즘 들어 이러한 장치들의 설계에 CAE 기술을 이용한 방법이 널리 사용되고 있다. 미디어 이송 시스템은 기구학적 메커니즘을 이용해서

종이나 지폐와 같은 얇은 판을 지정된 경로를 통해 이송하는 장치인데 여기서 종이의 이송과 분리, 롤러 및 가이드의 제어와 계측 등이 주요 연구 대상이다. 하지만 CAE 를 이용해 종이의 걸림 현상에 대한 연구 시, 종이의 물성치를 올바르게 입력하지 않았을 때에는 걸림 현상으로 대표되는 시스템의 결함에 대한 올바른 규명이나 결함을 방지하는 최적의 설계는 어렵게 된다.

하지만 종이는 크기, 무게, 강성, 온도, 습도와 같은 여러 가지 요인에 의해 물성치는 두드러진

접수일: 2007년 7월 18일; 게재승인일: 2008년 2월 11일

교신저자: 경희대학교 기계공학과

E-mail: sofeel79@empal.com Tel. (031) 201-3681

* 경희대학교 기계공학과

변화를 보인다. 이와 같은 종이의 동일한 성질을 가지는 재료의 물성치를 구하는 실험적 방법의 연구는 활발하게 진행 되어 왔다.

Feller 와 Carlsson¹은 순수 모멘트(Pure Moment)의 정의를 기본으로 굽힘 강성, 굽힘 강도와 같은 종이의 굽힘 특성을 측정하였다. Kaerenlampi²은 정보지(Information Paper)를 침엽수림 크래프트 펄프로 강화했을 때, 인장관련 물성치에는 거의 영향을 주지 않았으나, 종이의 파괴 에너지의 상당한 변화를 보인다는 것을 알아냈다. Waterhouse 와 Brennan³ 종이의 두께 방향에서의 탄성적인 특성의 변화와 응력변화와의 관계에 대해 연구하였다. Horio 와 Onogi⁴은 다양한 종류의 종이에 음파를 통과시켜 진전 속도를 산출하여 동적인 영률을 측정하였다. Lafond 와 Schley⁵은 온라인(On-line)으로 종이의 물성치를 측정하는 초음파 검사 기술을 적용하는 방법에 대한 연구를 진행해 왔으며, 특히 초음파를 이용한 영상 접근 방법으로 종이의 물성치를 결정하기도 하였다. Lafond 와 Jackson⁶은 종이의 기계적 물성치를 측정하기 위한 비접촉 레이저 초음파 장치를 개발하였으며, 종이뿐만 아니라 판지에 대해서도 실험을 진행하였다.

이와 같은 실험적 방법으로 구한 물성치와 CAE 기술을 이용하여 시뮬레이션 결과를 비교 분석하는 연구를 수행함으로써 MTS 의 설계 및 개발을 하고 있다.

하지만 일반적으로 사용되는 프린터 용지의 물성치는 가공 방법에 따라 다르고 습도에 매우 민감하기 때문에 일반적인 물성치 측정 방법으로 알기 어렵기 때문에 종이 제조 회사에서도 물성치를 공개하지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 종이의 정적, 동적 거동을 시뮬레이션을 통해 해석, 검증할 수 있도록 해석 시 필요한 종이의 물성치를 추정할 수 있는 실험적 방법과 수치해석 방법을 소개하였다.

본 논문 2 장에서는 종이의 정적, 동적 거동을 측정할 수 있는 시험 장비와 측정 방법이 소개되고, 실험은 종이의 이방성 특징을 잘 표현할 수 있는 실험 모델을 사용하여 진행되었다. 3 장에서는 상용 프로그램에서 사용한 유한 요소 모델이 소개되고, 4 장에서는 설계 기법을 통해 종이의 물성치를 찾기 위해 설계 변수 및 성능 지수가 정의된다. 5 장에서는 실험 계획법⁷이 수행되고 이를 바탕으로 메타 모델을 생성하게 된다. 또한 메타

모델을 기반으로 순차적 근사 최적화 기법^{8,9}을 통해 종이의 물성치가 추정된다.

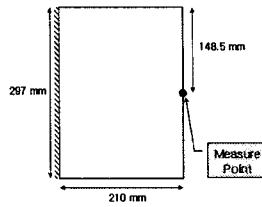


Fig. 1 Longitudinal

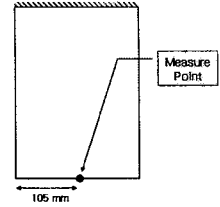


Fig. 2 Lateral

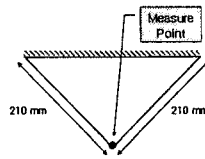


Fig. 3 Diagonal I

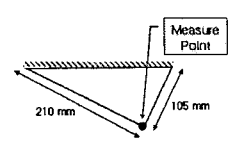


Fig. 4 Diagonal II

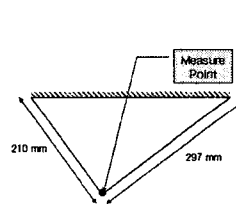


Fig. 5 Diagonal III

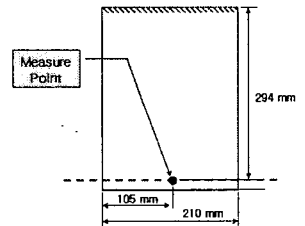


Fig. 6 Dynamic

2. 정적, 동적 거동 실험

2.1 정적 동적 거동 실험 모델

정적 처짐 실험은 종이의 일반적인 이방성 특성을 고려하여 두 방향의 처짐과 두 방향의 복합적인 영향으로 인한 처짐을 얻기 위해 가장 기본적인 5 가지의 정적 실험 모델로 진행되었다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 각각 두 방향의 처짐을 구함으로써 두 방향의 물성치를 예측하기 위한 모델이며, Fig. 3 에서 Fig. 5 의 3 가지 모델은 두 방향의 복합적인 영향으로 인한 처짐을 예측하기 위한 모델이다. 더 이상의 실험 모델을 선택하지 않은 이유는 위의 5 가지 모델에 대한 실험 결과로도 나머지 경우에 대한 설명이 가능하며, 추가적인 실험 모델은 결과의 비교, 분석 과정인 최적화 과정에서 복잡성을 가중시켜 최적화 수렴에 어려움을 줄 수

있기 때문이다.^{8,9} 또한 종이가 자유 진동을 할 때의 주파수(Frequency)를 얻기 위한 1 가지의 동적 거동 모델을 가지고 자유 진동의 변위 및 진폭 변화의 데이터를 얻고 고속 푸리에 변환(FFT)를 하여 실험을 진행하였다. 정적, 동적 거동에 대한 실험 모델은 Fig. 1 에서 Fig. 6 까지 보이는 것과 같다. 해석에 사용된 CAE 패키지에서는 종이를 직교 이방성 재료로 가정하고 모델링되기 때문에 실험도 동일하게 직교 이방성 재료로 가정하고 실험 모델을 선택하게 되었다. 서론에서도 언급되었지만, 종이는 여러가지 요인에 의해 물성치의 변화가 쉬우며, 유연한 복합재 물질이므로, 재료의 물성치를 얻기 위한 일반적인 실험 방법보다는 초음파를 이용하여 진전속도를 산출해 물성치를 찾는 방법과 같이 비접촉 방법으로 물성치를 얻는 방법이 좀더 적합하다고 판단되었다. 또한 본 연구의 목적은 실험과 해석을 통해 얻은 결과들의 차이를 최소화 하기 위한 최적화를 수행하는 것이기에, 무엇보다 실험 모델과 해석 모델이 동일해야 된다는 전제가 필요했다. 따라서 본 논문에서 소개되는 실험 모델, 실험 방법, 실험 장치는 본 목적에 부합되도록 선택하였다.

2.2 실험 장치

종이의 정적 처짐량과 동적 거동에 대한 결과를 얻기 위한 실험 장치는 Fig. 7 과 같이 구성하였다. 측정 대상인 종이와 종이의 수평 방향의 처짐을 계측할 수 있는 자와 수직 방향의 처짐을 계측할 수 있는 거리 센서, 동적 거동을 계측하기 위해 자체 제작한 테스트 베드, 센서의 신호를 중앙 처리기에서 인식할 수 있도록 해주는 신호 변환기와 중앙 처리기, 처짐량과 화면으로 볼 수 있게 하는 디스플레이가 사용된다.

2.3 정적, 동적 거동 측정

종이의 정적, 동적 거동 실험은 중력의 영향만을 받는 것을 전제로 해서 진행하였다. 일반적으로 사용되는 복사 용지는 건조한 상태로 종이 내부에 습기가 쉽게 스며들 수 있으므로 실험 직전까지 그 보관 상태가 매우 중요하며, 실험은 항상 일관성을 가지고 수행되어야 한다. 일관성의 결여는 측정할 때마다 결과의 오차를 다르게 만들며, 측정 되어진 결과에 대한 일반성을 얻지 못할 수도 있다.

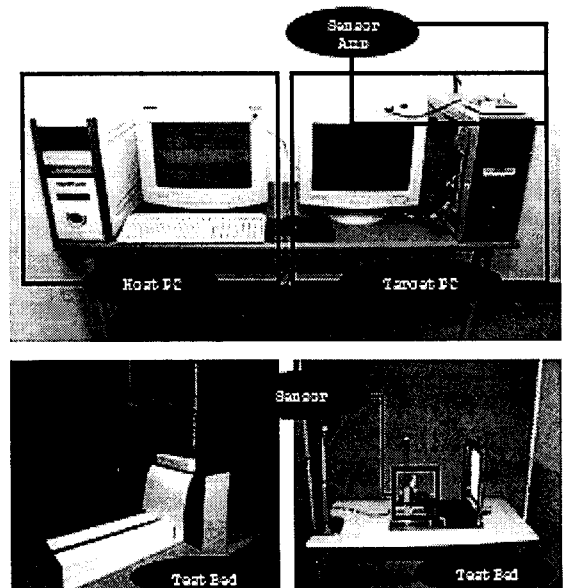


Fig. 7 Experiment Device and Test-beds

따라서 수십 번이 실험을 통해 그 값들을 평균해서 실험값으로 결정하게 되었다.

Fig. 8 에서 Fig. 9 는 다섯 가지의 정적 처짐 실험 경우 중에서 Fig. 1 에 소개된 경우에 대해 종이의 정적 처짐을 측정했던 방법을 사진으로 보여주고 있다. 이 때 제일 먼저 종이가 처지기 전에 센서에서 종이의 계측 점의 초기 위치를 먼저 측정된 위 종이가 중력장에서 처지도록 만든 뒤에 다시 비접촉 변위 센서를 이용하여 그 계측 점의 수직 방향 거리를 재어서 초기 위치에서 나중 처진 위치의 차이를 종이의 수직 방향 정적 처짐량으로 계산하였다. 그리고 처지는 길이 방향에 대한 처짐은 고정된 한 면에서 끝 점까지의 거리를 자로 측정된 값을 사용하기로 했다. 이와 같은 방법으로 나머지 4 가지 경우의 정적 처짐 실험에 대해서도 수행하였다.

또 다른 사진은 동적 거동에 대한 계측 방법을 보여주고 있다. Fig. 7 에 보여지는 것과 같이 동적 테스트 베드에 종이를 설치하고 초기 변위로 10mm 를 주고, 그런 다음 이 초기 변위를 없애고 비접촉 변위 센서를 이용해 자유 진동의 변위 변화를 계측하였다. 이와 같이 정적 처짐 및 동적 거동에 대한 실험 결과는 Table 1, 2 와 같다. 이 실험값들은 소수점 넷째 자리에서 반올림한 결과이다.

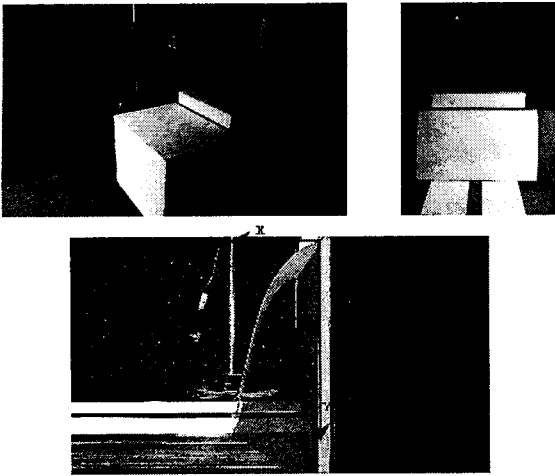


Fig. 8 Measuring Procedure for Static Deformation

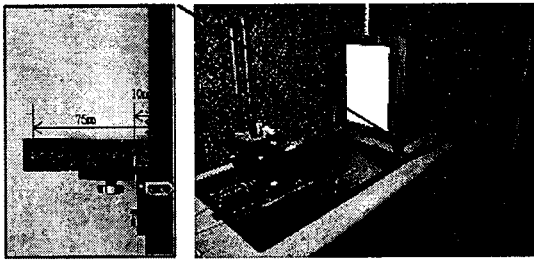


Fig. 9 Measuring Procedure for Dynamic Behavior

Table 1 Experiment Results I

		Unit(mm)	
Case		Longitudinal(X)	Vertical(Y)
1	Longitudinal	62.633	192.793
2	Lateral	75.566	280.716
3	Diagonal I	127.366	66.723
4	Diagonal II	91.233	11.736
5	Diagonal III	115.866	118.763

Table 2 Experiment Results II

		Unit(Hz)
Case		Frequency
6	Dynamic	0.9997

Fig. 10 는 자유 진동하는 종이의 변위 변화와 진폭 변화를 보여주며, Fig. 11 은 고속 푸리에 변환(FFT)의 결과를 보여주고 있다. 자유 진동이 주파

수는 Table 2 과 같다. 주파수는 소수점 다섯째 자리에서 반올림한 값이다.

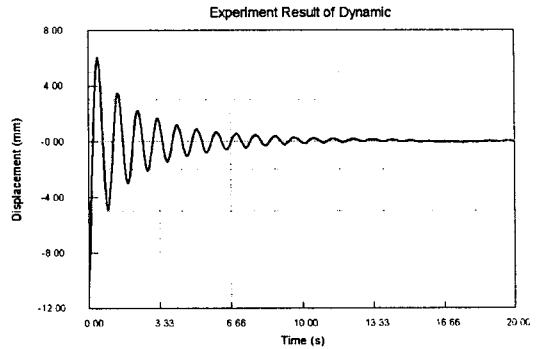


Fig. 10 Experiment Result of Dynamic

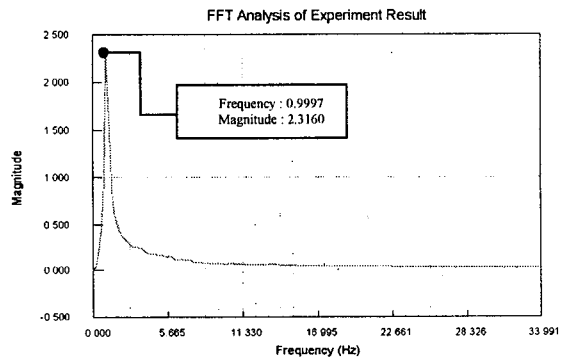


Fig. 11 FFT of Dynamic Experiment Result

3. 정적, 동적 거동 유한 요소 해석

3.1 유한 요소 모델

일반적으로 사용되는 상용 프로그램에서 종이는 대 변형을 하기 때문에 비선형 유한 요소 해석이 주로 사용된다. 3 차원상에서 종이는 질량을 가진 많은 절점(Node)들로 표현되며, 인접하는 절점들은 서로 탄성을 가지는 유한 요소로 정의되는 것이 일반적인 수치해석 방법이다. 여기서 유한 요소의 정적, 동적 거동은 식 (1)과 (2)의 지배 방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$\mathbf{K}\mathbf{u}=\mathbf{f} \quad (1)$$

$$\mathbf{K}=\mathbf{K}(E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \mathbf{u}) \quad (2)$$

여기서, K 는 각각 유한 요소의 강성 행렬인데 이방성 재료일 경우에는 직교 두 방향의 탄성 계수 E_1 과 E_2 , 전단 계수 G_{12} 그리고 포아송비 ν_{12} 와 변형 u 에 대한 함수로 표현할 수 있다. 유한 요소의 강성 행렬은 일반적으로 Total Lagrangian Method¹⁰에 의해 구해진다. 또한 외력 벡터 f 는 본 문제에서는 각 절점에 작용하는 중력을 의미한다. 정적 처짐, 동적 거동을 위한 종이의 유한 요소 모델 4 개의 절점을 가지고 있는 탄성 shell 이다. 요소의 길이는 가로, 세로 동일하게 3mm 이며, 절점의 수는 7100 개, 요소의 수는 6930 개이다. 정적 처짐, 동적 거동에 대한 종이의 유한 요소 모델의 경계 조건은 Fig. 1 부터 fig. 6 까지 각각 사선으로 표시되었으며, 동적 거동을 위한 시뮬레이션 환경은 실험과 동일한 환경을 만들기 위해 Fig. 12 와 같이 모델링하였다. 가이드와 가이드 바드를 이용하여 실험과 동일한 초기 변위를 표현했으며, 접촉하는 범위의 크기가 시스템의 전체 범위 안에서 정의되게 하기 위해 롤러를 사용하였다.

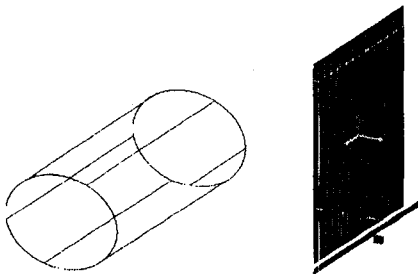


Fig. 12 Virtual Model for Dynamic Behavior

Table 3 Initial Values of Material Property of a Paper

Density		7.38e-07 kg/mm ³
Mass		4.98e-03 kg
Young's Modulus	E_1	4500 N/mm ²
	E_2	2500 N/mm ²
Shear Modulus	G_{12}	2000 N/mm ²
Damping Ratio		8.00e-03
Poisson's Ratio		0.3

3.2 유한 요소 해석 결과

Table 3 는 정적, 동적 거동의 결과를 얻기 위해 모델링된 유한 요소 모델의 적합성과 결과에 대한 경향을 알기 위해 사용된 초기 물성치를 보여준다. 그리고 Table 4 은 미디어 이송 시스템 동역학 해석 프로그램인 RecurDynTM/MTT3D 를 사용하여 아래의 초기 물성치를 입력하여 얻은 결과이다.

Table 4 Simulation Results

		Unit(mm)	
Case		Longitudinal(X)	Vertical(Y)
1	Longitudinal	24.156	200.319
2	Lateral	26.719	286.191
3	Diagonal I	81.057	115.49
4	Diagonal II	84.849	37.861
5	Diagonal III	64.26	148.49
6	Dynamic	1.1906 (Hz)	

4. 물성치 추정 방법

4.1 최적화 알고리즘

CAE 를 이용하는 엔지니어들 중에서 가끔 자신이 설계하는 제품을 수치해석을 위해 모델링한 뒤 시뮬레이션 결과를 실험 결과로부터 검증할 때 잘 맞지 않은 경우 일반적으로 시뮬레이션에서 사용한 인자들을 실험 결과에 맞도록 튜닝을 하는 경우가 있다. 본 논문에서는 그 튜닝 방법을 R-INOPL 과 RecurDynTM/AutoDesign 에 제공된 근사 최적화 알고리즘을 통해 수행해 보았다.

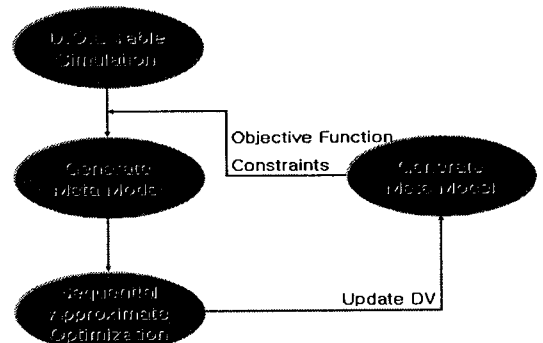


Fig. 13 Flow Chart to find Material Property of a Paper

Fig. 13 은 시뮬레이션과 설계 프로그램 사이의 흐름도를 보여주고 있다. 이것은 요즘 비선형 문제에 대한 최적 설계 방법으로 대중화되고 있는 방법이다. 먼저 적절한 실험계획법으로 데이터를 수집하고 크리깅(Kriging) 메타 모델을 만든다. 그리고 수치 최적화 기법으로 문제를 해결한 후, 이를 토대로 재해석을 추가하여 수렴시키는 순차적 근사화 최적화 기법(SAO)이다. 이런 작업이 반복되면서 수렴 허용치 내에서 최적의 설계 변수의 조합을 찾는 방법이다.

4.2 튜닝 설계 변수와 목적 함수 정의

본 연구에서 튜닝을 위한 최적화 문제를 식 (3), (4)와 같이 정하였다.

$$Min. \Psi(x_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^{nconst} (x_i - x_{exp})^2} \quad (3)$$

$$\Phi_i(x_i) = x_i - x_{exp} = 0 \quad (4)$$

Table 5 Design Variables

Unit(N/mm ²)			
DV	Lower	Current	Upper
E_1	1000	4500	8000
E_2	1000	4500	8000
G_{12}	100	2000	3900
Density(kg/mm ³)	5.0e-08	5.0e-06	5.0e-04

여기서 Ψ 는 목적 함수이고 Φ_i 는 구속 조건이다. x_i 는 시뮬레이션에서 얻어진 정적, 동적 거동에 대한 결과를 의미하며, x_{exp} 는 실험 결과를 의미한다. 따라서 6 가지 경우의 실험에 대한 총 11 개의 관측치, 목적 함수는 1 개, 등식 제약조건은 10 개가 구성된다. 설계 변수는 Table 5 에서 정의하였다. E_1 과 E_2 는 직교 두 방향의 탄성 계수, G_{12} 는 전단 계수를 의미한다. 여기에서 제시한 Lower, Upper 값들은 종이와 유사한 복합재료들이 가지는 물성치의 범위를 참고문헌을 참고하여 결정하였다. 또한 Table 3 와 비교하면 질량(Mass)과 감쇠비(Damping Ratio)는 설계 변수로 정의되지 않

았다. 이는 유한 요소의 크기와 밀도를 알면 질량은 알게 되는 값이고, 감쇠비 또한 영률, 전단계수 등으로 이루어진 강성행렬에 비례하는 값이므로 삭제하게 되었다. 등방성 재료의 경우 0.5 보다 작은 값의 포아송비를 가지는 것을 감안하여 포아송비를 0.3 인 상수로 가정하였다.¹¹

4.3 메타모델링을 위한 초기 실험 계획

실험 계획법은 많은 분야에서 널리 사용되고 있다. DOE 에도 현존하는 많은 방법들이 있지만 본 논문에서는 ISCD-II 라는 실험 계획법을 사용하여 Table 6 와 같은 9 개의 실험점을 구하였다. Fig. 14 는 9 개의 실험점을 사용해서 얻은 시뮬레이션 결과를 보여준다.

Table 6 Design Variables and DOE Table

Unit(N/mm ²)					
Run	DOE Table	E_1	E_2	G_{12}	Den(kg/mm ³)
1	3-1-3-1	8000	1000	3900	5.0e-08
2	1-3-3-3	1000	8000	3900	5.0e-04
3	1-3-1-1	1000	8000	100	5.0e-08
4	3-3-1-3	8000	8000	100	5.0e-04
5	1-1-3-3	1000	1000	3900	5.0e-04
6	3-1-1-3	8000	1000	100	5.0e-04
7	3-3-3-1	8000	8000	3900	5.0e-08
8	1-1-1-1	1000	1000	100	5.0e-08
9	2-2-2-2	4500	4500	2000	5.0e-06

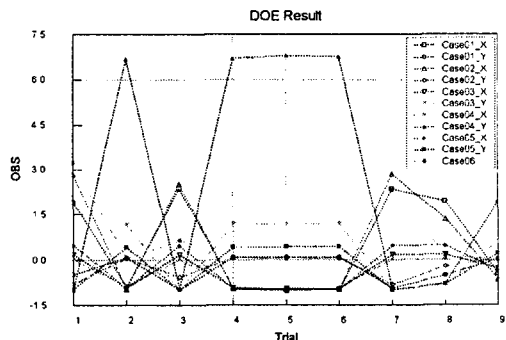


Fig. 14 Constraint Violations in DOE

4.4 순차적 최적 설계를 이용한 종이의 물성치 추정

4.3 절에서 소개한 실험 계획법에 의한 결과를 가지고 메타모델을 만들고 최적 설계를 수행한다. 결과적으로 새로운 튜닝 설계 변수들의 값이 도출된다.

이것으로 새로운 시뮬레이션을 수행해서 새로운 목적 함수와 구속 조건 값들을 계산한다.

Table 7 Convergence History of Design Variables in the SAO

Unit(N/mm ²)				
Run				Den(kg/mm ³)
1	1000	1000	100	7.0e-08
2	4353	4556	1611	4.7620e-06
3	1088	4768	730.5	1.859e-06
4	1128	5531	100	7.87e-07
5	1000	5285	522.9	1.440e-06
6	1776	6059	759.4	2.246e-06
7	1606	8000	100	6.22e-07
8	1000	7118	465.8	1.062e-06
9	1000	4639	100	7.26e-07
10	1285	5187	505.2	1.596e-06
11	1205	4971	537	1.587e-06
12	1416	5513	578.9	1.791e-06

이 과정을 반복하면 종이의 물성치를 추정할 수 있다. Table 7 은 순차적 최적 설계에서 나온 설계 변수들이며 Table 8 은 시뮬레이션을 통해 얻은 결과이다. Fig. 15 는 시뮬레이션 결과로부터 얻은 관측치들의 값을 그래프로 표현한 것이다. 여기에서 10 번째부터의 해석 결과를 보면 설계 변수들의 변화에도 앞에서의 경우와는 달리 관측치의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. 이는 E_1 의 경우 1205 ~ 1416, E_2 의 경우 4971 ~ 5513, G_{12} 의 경우 505.2 ~ 578.9, 밀도는 1.587e-06 ~ 1.596e-06 의 값들을 가질 경우 실험 결과에 근접함을 의미한다. 또한 위의 설계 변수들의 범위를 보면 G_{12} 변수가 가장 민감한 물성치 인자임도 알 수 있다.

Table 8 과 fig. 15 를 볼 때, 세가지 Case01_X, Case02_X, Case04_Y 는 나머지 8 가지 경우와는 다른 경향을 보인다.

나머지 8 가지 경우는 SAO 가 진행되면서 같

은 경향으로 수렴하는 것을 볼 수 있으나 이 세가지 경우는 전혀 다른 경향을 보이며, 결국에는 수렴하지 못했다. 이는 최적화의 목표 값이 된 실험 값의 오차, 최적화 문제에서의 특정 설계 변수의 누락 등으로 그 원인을 찾을 수 있다.

Table 8 Convergence History of Deflections and Frequency in the SAO

Unit(mm)						Unit(Hz)
X (Longitudinal Deflection)						Frequency
Run	Case 1 (OBS1)	Case 2 (OBS3)	Case 3 (OBS5)	Case 4 (OBS7)	Case 5 (OBS9)	Case6 (OBS11)
1	169.481	147.365	147.182	93.841	167.831	1.3562
2	36.089	27.632	89.782	86.139	76.652	1.1625
3	88.081	26.930	123.901	90.396	127.956	1.1625
4	156.802	46.340	142.684	93.169	160.232	1.1625
5	118.956	31.892	134.800	92.012	146.122	1.1625
6	83.487	29.474	121.984	90.424	124.373	1.1625
7	186.894	66.989	146.595	93.667	167.711	1.1625
8	177.686	46.683	145.494	93.464	165.739	1.1625
9	148.370	44.207	141.298	93.009	157.587	1.1625
10	98.988	31.144	128.305	91.251	134.821	1.1625
11	97.523	30.372	127.836	91.151	134.077	1.1625
12	94.550	30.508	126.6	91.019	131.990	1.1625
Unit(mm)						
Y (Vertical Deflection)						
Run	Case 1 (OBS2)	Case 2 (OBS4)	Case 3 (OBS6)	Case 4 (OBS8)	Case 5 (OBS10)	
1	115.446	238.913	18.384	3.480	32.935	
2	195.945	285.831	109.863	35.204	143.038	
3	176.738	286.09	75.988	23.927	106.176	
4	129.869	278.738	38.163	11.075	56.792	
5	160.397	284.144	57.799	17.652	83.451	
6	178.735	285.099	78.674	23.851	109.840	
7	89.329	271.535	21.944	6.372	33.204	
8	104.291	278.563	27.490	8.589	40.837	
9	138.051	279.517	42.389	12.204	62.884	
10	171.607	284.445	69.431	20.869	98.572	
11	172.332	284.744	70.168	21.251	99.444	
12	173.769	284.693	72.084	21.750	101.836	

나머지 8 가지 경우는 SAO 가 진행되면서 같

은 경향으로 수렴하는 것을 볼 수 있으나 이 세가지 경우는 전혀 다른 경향을 보이며, 결국에는 수렴하지 못했다.

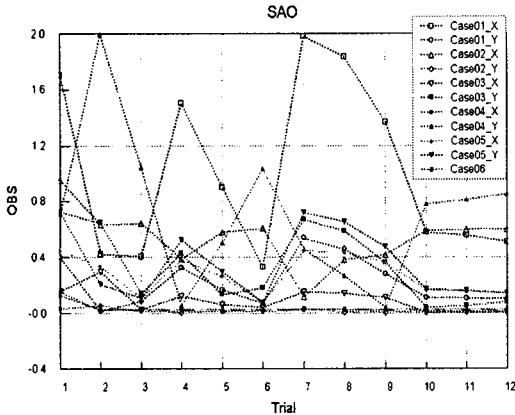


Fig. 15 Object Function and Constraint Violations in SAO

이는 최적화의 목표 값이 된 실험값의 오차, 최적화 문제에서의 특정 설계 변수의 누락 등으로 그 원인을 찾을 수 있다. 하지만 더 이상의 설계 변수의 선택은 최적화 과정의 에러를 증가시켜 관측치의 수렴을 방해할 수도 있다. 또한 본 연구에서 여러 가지의 설계변수의 조합으로 최적화를 수행한 결과 Table 8 과 Fig. 15 에서 보인 결과가 가장 잘 수렴하는 것을 볼 수 있었다.

5. 결론

프린터나 복사기에 일반적으로 사용되는 종이의 물성치를 상업용 소프트웨어와 실험적인 방법을 이용하여 추정하였다. 중력장에서 종이의 정적, 동적 거동을 측정할 수 있는 실험 장치를 구성하였고 종이의 이방성 성질을 고려할 수 있는 실험적인 방법을 제안하였다. 상용 프로그램을 이용하여 종이의 거동을 해석하였고 실험 결과와 함께 최적 설계 알고리즘을 통해서 종이의 물성치를 추정할 수 있었다. 최적 설계 문제에서 설계변수는 4 개, 목적함수 1 개, 10 개의 등식 제약조건을 정의하였다. 실험 계획법과 순차적 근사화 기법을 이용해 총 21 번의 시물레이션을 통해 근사화된 종이의 물성치를 얻을 수가 있었다.

결론적으로 미디어 이송 시스템에 관련된 시물레이션을 할 때, 실제 MTS 에서 나타나는 현상을 잘 묘사하기 위해 필요한 종이의 물성치를 추정하는 방법을 본 논문에서는 제안하였다.

후 기

이 논문은 2007 년 BK21 사업에 의해 지원되었습니다. 경희대 MTS 연구회에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Fellers, C. and Carlsson, L., "Measuring the Pure Bending Properties of Paper," Tappi Journal, Vol. 62, No. 8, pp. 107-109, 1979.
2. Karenlampi, P., "Mechanical Properties of Information Papers : The Effect of Softwood Kraft Pulp," Tappi Papermakers Conference Proceedings, No. 1, pp. 365-378, 1997.
3. Waterhouse, J., Stera, S. and Brennan, D., "Z-Direction Variation of Internal Stress and Properties in Paper," Technical Section, Canadian Pulp and Paper Association, Vol. 13, No. 1, pp. 33-37, 1987.
4. Horio, M. and Onogi, S., "Dynamic Measurements of Physical Properties of Pulp and Paper by Audiofrequency Sound," Journal of Applied Physics, Vol. 22, No. 7, pp. 971-977, 1951.
5. Deason, V. A., Telschow, K. L., Schley, R. S. and Watson, S. M., "Imaging the Anisotropic Elastic Properties of Paper with the INEEL Laser Ultrasonic Camera," AIP conference proceedings, Vol. 509, No. A, pp. 255-262, 2000.
6. Lafond, E., Ridgway, P., Jackson, T., Habeger, C. and Russo, R., "A Laboratory Laser-Ultrasonic Instrument for Measuring the Mechanical Properties of Paper Webs," AIP conference proceedings, Vol. 657, No. B, pp. 1665-1672, 2003.
7. Kim, M. S., "RD/AutoDesign: User's Guide," FunctionBay, 2006.
8. Kim, M. S., "R-INOPL: Sequential Approximate Design Optimization Combined With Meta-Model Generator (Version4.0)," Mathematical Computational Research & Development, 2005.
9. Kim, M. S., "E-INOPL: Experimental Design Table

Generator (Version1.5),” Mathematical Computational Research & Development, 2004.

10. Bathe, K. J., “Finite Element Procedure,” Prentice-Hall, Inc., pp. 335-341, 1996.
11. James, M. G., “Mechanics of Materials,” Books/cole, pp. 24-26, 2004.