

실험 및 시뮬레이션을 통한 종이 물성치 튜닝

*이근표¹, 조희제², 최진환³

¹ 경희대학교 기계공학과, ²평선베이(주), ³경희대학교 기계공학과

Tuning of The Material Property of a Paper by Using Experiment and Simulation

*G. P. Lee¹, H. J. Cho², J. H. Choi³

¹ Dept. of Mech. Eng., Kyunghee Univ., ² Funcitonbay, Inc., ³ Dept. of Mech. Eng., Kyunghee Univ

Key words : Characteristic of a Paper, Meta-Models, D.O.E, Sequential approximate optimization

1. 서론

프린트, 복사기, 팩스밀리, ATM(Automatic Teller Machine) 등 많은 미디어 이송 시스템 (Media Transport System ; MTS)의 설계에 있어서 종이를 원활하게 이송하고 생산비를 최소화 할 수 있는 부품의 치수 및 물성치를 결정하는 것이 가장 중요한 부분이다. 특히나 종이의 물성치를 아는 것이 MTS 설계 단계에서의 실험이나 시뮬레이션 과정에서 보다 믿을 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 종이 특히 인쇄용지의 경우 두 방향의 성질이 서로 다른 특징(Orthotropic Characteristic)을 가지고 있고 복합재의 특징도 가지고 있다. 그리고 유연성(Flexibility)을 가지고 있으며 습도 및 온도에 의해 특성이 변하기 쉽다. 따라서 종이의 물성치를 결정하는 것은 쉬운 일이 아닐 것이다. 본 연구에서는 종이의 물성치를 결정한다기 보다는 가장 효율적인 종이 물성치 결정 방법을 제시하는데 그 목적이 있다. 먼저 3가지 종이 모델에 대해 실험 결과치를 얻는다. 똑같은 3가지 실험 모델을 RecurDyn™/MTT3D를 이용해 시뮬레이션 모델을 만들어 시뮬레이션 결과치를 얻는다. 실험 및 시뮬레이션의 결과를 비교해 가며, 두 개의 결과치가 같을 때 종이의 E1(짧은 방향의 Young's Modulus), E2(긴 방향의 Young's Modulus), G12(면12의 Shear Modulus)을 찾는다. 이 때에 시뮬레이션의 횟수를 최소화하기 위해 적절한 D.O.E 방법을 적용했다. 또한 전체적으로 두 개의 결과치를 비교, 검증하는 과정에서 R-INOPL, 최적화 알고리즘(Optimization Algorithm)을 이용했다.

2. 실험 방법 및 시뮬레이션 모델

실험은 중력이외에는 아무런 외력이 없다고 가정하고 종이의 정적 처짐을 산출하는 것이다. 실험장치는 Host PC, Target PC, Amp, Sensor로 꾸며 졌다. 여기서 Matlab/Simulink의 xPC Target을 이용하여 Host PC와 Target PC를 연동하였고, 이 두 PC 사이에서는 Serial 통신을 이용하여 데이터가 서로 교환된다. Host PC에는 Matlab이 설치되어 있고, Target PC는 센서에서 오는 아날로그 신호를 디지털신호로 변화하고 그때 그때의 신호를 모니터한다. 센서는 3개의 모델에 대해 정적 처짐을 측정하는 비접촉 변위 센서이다.

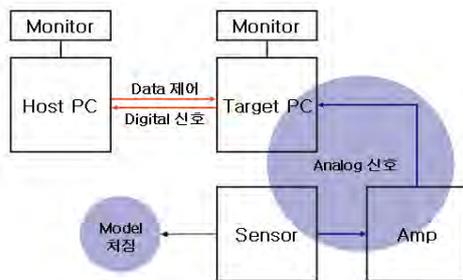


Fig. 1 Diagram of experimental device.

RecurDyn™/MTT3D에서 종이 모델은 유한 요소 모델로 표현된다. 본 논문에 제시한 3개의 모델은 종이의 특성을 잘 표현하기 위해 고안되었다. 아래 보이는 모델은 유한 요소 모델로써 네모로 표시(검은색)되어 있는 노드는 경계조건을 의미하며, 원으로 표시(빨간색)되어 있는 것은 처짐 측정 지점을

의미한다. 실험 및 시뮬레이션에 쓰인 인쇄용지는 A4크기, 80 GSM(g/m²) 이다.

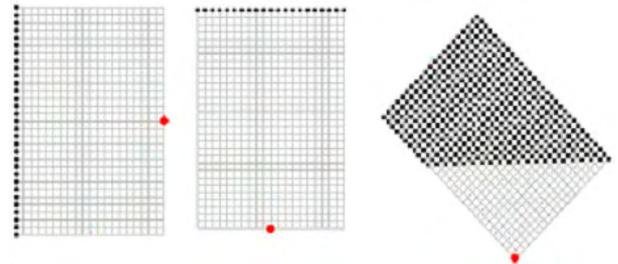


Fig. 2 FE Models for Simulation (case1:Short, case2:Long, case3:ISO)

3. 실험 결과 및 설계 변수

위의 그림1에서 언급한 실험 장치를 이용한 실험 결과는 다음과 같다. 3가지 경우에 대한 모델은 위의 그림2를 참조한다.

Table 1 Experiment Result

Case		Longitudinal (mm)	Vertical (mm)
1	short	44.0	-183.0
2	long	57.0	-268.0
3	ISO	129.0	-55.0

표1에서 보인 결과는 이제 곧 설명될 최적화 문제의 목표 함수에서 δ_{exp} 가 된다. 경제적인 실험 진행과 검증 과정의 신빙성을 위해 최적화 이론을 이용했다. 본 연구에 적용된 최적화 문제를 다룰 때 기본이 되는 목표 함수(Objective Function) (1)와 구속 조건(Constraints) (2), 그리고 설계변수 (Table 2)는 아래와 같다.

$$\Psi(\underline{b}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{nconst} (\delta_i(\underline{b}) - \delta_{exp})^2} \quad (1)$$

$$\Phi_i(\underline{b}) = \delta_i(\underline{b}) - \delta_{exp} = 0 \quad (2)$$

위 식(2)에서 x_i 는 시뮬레이션의 결과인 처짐 변위가 될 것이다. 본 연구에서 사용하게 될 설계변수는 E1, E2, G12 총 3개이다.

Table 2 Lower and upper limitation of design variables

Design variable	Lower (N-mm)	Current (N-mm)	Upper (N-mm)
E1	500	2000	3500
E2	2000	4000	6000
G12	500	1500	2500

4. 실험 계획법과 최적 설계 알고리즘을 이용한 물성치 추정

RecurDyn™/AutoDesign에서, 초기_메타모델을 생성하기 위해 설계 변수의 개수가 3개인 점을 고려하여 Incomplete Small Composite Design II (ISID-II) 방법을 적용하였다. 결과적으로 총 5개의 실험점을 얻을 수 있었다.(Table 3 참조) 얻어진 설계변수

값들을 이용해서 시뮬레이션을 총 5 회 반복하면서 성능지수를 해석 프로그램에서 얻는다. 실험 계획법으로 얻어진 5번의 시뮬레이션 결과(Table 4와 Fig. 3 참조)를 시작으로 다음 단계의 최적화 설계를 진행한다.

Table 3 D.O.E Table (apply ISID-1)

run	D.O.E Table	E1 (N-mm)	E2 (N-mm)	G12 (N-mm)
1	3-1-3	3500	2000	2000
2	3-3-1	3500	6000	500
3	1-3-3	500	6000	2500
4	1-1-1	500	2000	500
5	2-2-2	2000	4000	1500

Table 4 Simulation Results of D.O.E Table

run	E1	E2	G12	Case1		Case2		Case3	
				x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)
1	3500	2000	2500	72.45	-173.11	36.96	-275.28	131.95	-47.55
2	3500	6000	500	67.10	-175.19	66.76	-264.78	126.31	-59.23
3	500	6000	2500	20.04	-191.15	64.83	-265.43	129.34	-53.21
4	500	2000	500	20.19	-191.89	34.03	-276.41	89.66	-100.76
5	2000	4000	1500	46.26	-182.53	51.55	-270.00	125.20	-61.30
Experiment Result				44.0	-183.0	57.0	-268.0	129.0	-55.0

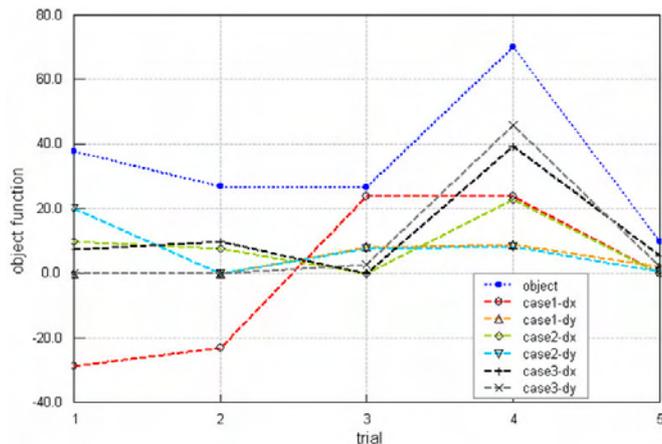


Fig. 3 D.O.E Result (Plot)

Table 4에서 보면 각 모델의 경우 실험 결과치가 시뮬레이션 결과들 사이에 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 D.O.E Table의 구성이 잘 되었다는 것을 보여준다. 하지만 경우 3에서는 앞의 경우들과는 다른 결과를 보여준다. 이것은 종이의 특성이 주위 상황에 따라 많이 변화한다는 것을 단적으로 보여주는 것이다. 또한 앞으로 진행될 연구 및 실험에서 정밀함을 요하는 중요한 이유가 된다.

5. 순차적인 근사해 및 결론

5번의 시뮬레이션 결과를 시작으로 근사 최적 해를 계산해 나간다. 추가 시뮬레이션(Sequential Approximate Optimization ; SAO) 11번 만에 믿을 만한 최적 해를 찾아 낼 수 있었다. 이때의 E1은 1868 (N-mm), E2은 4759 (N-mm), G12은 1947 (N-mm)이다. 최적 설계를 위한 3차원 상에서의 종이 모델을 상용 동역학 해석 프로그램을 이용하여 모델링하였고, 정적 처짐 해석을 수행하였다. 종이의 특성 중 정적 특성을 정의 할 수 있는 3가지의 요소를 설계변수로 정의하였다. 1개의 목적함수, 1개의 구속조건을 가진 설계 문제를 R-INOPL을 이용해서 17번 해석을 통해 각 설계변수의 최적해를 찾을 수 있었다. 아래의 표와 그림은

SAO 결과이다.

Table 5 Simulation Results of SAO

SAO	E1	E2	G12	Case1		Case2		Case3	
				x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)	x(mm)	y(mm)
9	1602	4631	2048	39.8	-184.7	55.9	-268.5	128.3	-55.5
10	1722	4581	2229	41.7	-184.1	55.6	-268.6	129.5	-53.1
11	1868	4759	1947	44.0	-183.3	57.0	-268.1	128.6	-54.9
12	1874	4761	1952	44.1	-183.3	57.0	-268.1	128.6	54.8
13	1895	4722	1954	44.1	-183.2	56.8	-268.2	128.6	-54.8
Experiment Result				44.0	-183.0	57.0	-268.0	129.0	-55.0

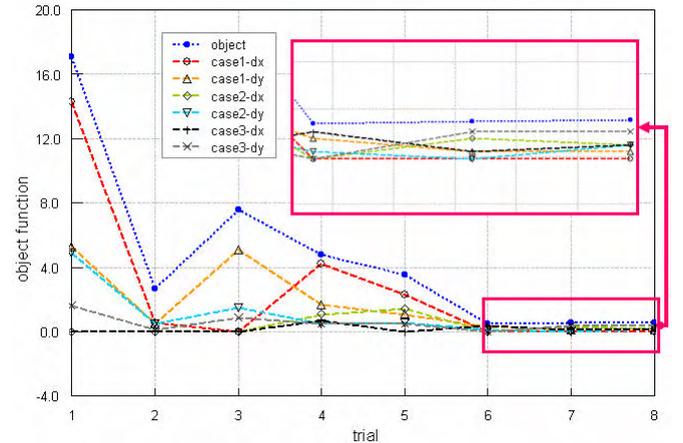


Fig. 4 Simulation Results of SAO (Plot)

참고문헌

1. Cho, H. J., Bae, D. S., Choi, J. H., Lee, S. G. and Rhim, S. S., " Simulation and Experimental methods for Media Transport System: Part 1, Three-Dimensional Sheet Modeling Using Relative Coordinate", Journal Of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 305~311, 2005.
2. 이순걸, 최진환, 배대성, 조희제, 송인호, 김민수, "수치해석 프로그램을 이용한 미디어 이송 장치의 기구학적 최적설계", 정밀공학회 2006 춘계학술대회 논문집 107-108.
3. R-INOPL (Sequential Approximate Design Optimization combined with Meta- Model Generator) Version 4.5 Guide Book , Mathematical Computation Research & Development Inc.