<응용논문> **DOI:10.3795/KSME-A.2011.35.5.575** ISSN 1226-4873

응력 최소화를 위한 클리닝 블레이드 최적설계§

박창현*· 이준희**· 최동훈***†
* 한양대학교 기계공학과 , ** 삼성전자㈜ , *** 한양대학교 최적설계신기술연구센터

Design Optimization of Cleaning Blade for Minimizing Stress

Chang-Hyun Park*, Jun-Hee Lee ** and Dong-Hoon Choi***†
* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,
** Samsung Electronics Co., Ltd.,
*** The Center of Innovative Design Optimization Technology, Hanyang Univ.

(Received December 15, 2010 ; Revised February 18, 2011 ; Accepted February 21, 2011)

Key Words: Laser Printer(레이저 프린터), Cleaning Blade(클리닝 블레이드), Cleaning Performance(클리닝 성능), Design of Experiments(실험계획법), Metamodel(근사모델), Design Optimization(최적설계)

초록: 클리닝 블레이드는 레이저 프린터 토너 카트리지에 장착된 감광드럼 표면의 잔류 토너를 제거하는 우레탄 재질의 고무부품이다. 기존에는 고무 블레이드의 클리닝 성능과 수명에 대한 다양한 연구들이 수행되었으나, 본 연구에서는 클리닝 성능과 부품간의 간섭에 대한 구속조건들을 모두 만족하면서 클리닝 블레이드에 발생하는 최대응력을 최소화 하는 클리닝 블레이드의 형상최적설계를 수행하였다. 상용 PIDO 툴인 PIAnO 를 이용하여 클리닝 블레이드의 구조해석절차를 통합하고 자동화하였으며, 최적설계를 위해 PIAnO 에서 제공하는 실험계획법과 근사화기법, 최적화 알고리즘을 사용하였다. 최적설계 결과, 초기 모델 대비 최대응력을 32.6% 감소 시킬 수 있는 최적의 설계안을 도출하였으며, 이를 통해 본 연구에서 수행한 최적설계 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

Abstract: A cleaning blade is an attachment installed in the toner cartridge of a laser printer for removing the residual toner from an organic photo-conductive drum. There have been many studies on the performance and life of the rubber blade. We focus on optimally designing the blade shape parameters to minimize the maximum stress of the blade while satisfying design constraints on the cleaning performance and part interference. The blade is optimally designed using a design of experiments, meta-models and an optimization algorithm implemented in PIAnO (process integration, automation, and optimization), a commercial PIDO (process integration and design optimization) tool. We integrate the CAE tools necessary for the structural analysis of the cleaning blade, automate the analysis procedure, and optimize the solution using PIAnO. We decreased the maximum stress by 32.6% in comparison with that of the initial design.

- 기호설명 -

σ_{max} : 최대응력
P_N : gf/cm 단위의 선압
$D_{CT\text{-}OPC}$: 블레이드 접촉점과 감광드럼 중심간의 거리
R_{OPC} : 감광드럼의 반경
$M_{CT\text{-}OPC}$: 선접촉 허용거리
$D_{BL\text{-}CR}$: 블레이드 상단점과 대전롤러 중심간의 거리
R_{CR} : 대전롤러의 반경
$M_{BL\text{-}CR}$: 블레이드와 대전롤러간의 간섭방지 여유거리
$D_{BK\text{-}CR}$: 브라켓과 대전롤러 중심간의 거리
$M_{BK\text{-}CR}$: 브라켓과 대전롤러간의 간섭방지 여유거리

§ 이 논문은 대한기계학회 2010 년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임
† Corresponding Author, dhchoi@hanyang.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

인터넷의 급속한 발전과 대중화로 인하여 온라인 상에서 막대한 정보들이 넘쳐나고 이는 오프라

인에서의 인쇄 욕구로 이어져 인터넷시대에서도 프린터 수요는 컴퓨터 및 각종 모바일 기기 수요와 더불어 폭발적으로 증가하였다. 특히 전통적으로 오피스 환경에 적합한 대형 제품 위주였던 프린터가 이제는 가정 및 소형 오피스 환경 수요에 맞추어 소형화되고 있으며, 이에 따라 프린터 개발에 더욱 정밀하고 효율적인 설계 기술이 요구되고 있다.

레이저 프린터는 Fig. 1 에서와 같이 전자사진(electro-photography) 기술을 이용하여 토너라는 미소 고분자 입자를 출력하고자 하는 이미지에 따라 종이에 인쇄하는 기기이다. 레이저 프린터에서의 인쇄동작은 감광드럼(Organic Photo Conductive drum; OPC drum) 표면에 전하를 균일하게 충진하는 대전(charging)과 화상 데이터를 작성하는 노광(exposure), 노광 부위 정전잠상(latent image)에 실질적인 토너를 부착하는 현상(development), 종이와 같은 미디어(media)에 직접 혹은 간접적으로 토너를 이동시키는 전사(transfer), 최종적으로 용지 위의 토너를 열융착 하는 정착(fusing) 등의 과정이 순환 형태로 반복적으로 일어남으로써 연속적으로 이루어지게 된다.

토너 카트리지 내부에서는 전사 이후 감광드럼 표면에 미전사된 잔류 토너 및 기타 지분 등의 미소 입자가 남게 되며 이를 제거하는 클리닝(cleaning) 과정이 필요하다. 클리닝이 제대로 되지 않을 경우 제거되지 못한 입자들에 의해 대전롤러(Charge Roller; CR)가 오염되어 감광드럼 표면의 전하 충진이 균일하지 못하여 인쇄 품질이 저하될 뿐만 아니라 지속적인 대전롤러 오염으로 인해 토너 카트리지의 수명 또한 단축될 수 있다.

클리닝에 대해서는 다양한 관련 기술들이 개발되었으나 구현 방법의 용이성과 우수한 성능, 저렴한 가격으로 인해 블레이드 클리너 방식이 널리 사용되고 있다. 블레이드 클리너 방식은 고무의 반발탄성력을 이용하여 회전하는 감광드럼의 미전사된 잔류 토너 및 기타 입자(지분) 성분을 물리적으로 제거하는 방식이다.

블레이드 클리너 방식 중 트레일링 방식(trailing type)의 클리닝 블레이드는 폐토너 수거가 용이하지 못해 실제 적용이 어려워 적용 예가 많지 않으나 Takahashi[1]가 그의 특허 문헌에서 언급한 바와 같이 소음 측면에서 유리하고 블레이드 말림 현상이 없다. 신규 적용된 트레일링 방식의 클리닝 블레이드는 우레탄 재질로서 금속 브라켓에 고정되어 감광드럼에 일정 압력으로 접촉 후 변형된 형상을 유지하며, 변형된 형상의 오랜 지속으로 인한 영구변형의 문제가 제기되었다. 영구변형이 발생하게 되면 고무의 탄성이 약해지면서 클리닝 성능이 저하될 수 있으므로 클리닝 성능을 고려한 정밀한 클리닝 블레이드의 설계가 필요하다.

1938 년 Carlson[2]에 의해 최초로 정전식 복사기가 발명된 이후 현재 고화질의 컬러 프린터까지 전사사진방식의 레이저 프린터는 많은 기술적 발전을 이루어 왔고 클리닝 관련 기술 또한 더불어 발전해 왔다. 고무 소재를 사용한 클리닝 블레이드는 1970 년대 Xerox 와 Canon 에서 상용화된 이후 대다수의 레이저 프린터 생산업체에서 사용하고 있으며, 클리닝 블레이드의 소재와 형상, 물리적 현상에 대한 많은 연구 결과가 발표되었다.

Royka, Gerbasi, 그리고 Till[3~5] 등은 그들의 특허에 기술한 바와 같이 고무 소재를 이용한 클리닝 블레이드를 소개하며 설계 예시를 제시하였다. Till[6] 등은 실험적 연구를 통해 클리닝 블레이드의 형상 파라미터와 클리닝 성능과의 상관관계를 도출하였으며, 감광드럼과의 접촉으로 인해 변형된 클리닝 블레이드 형상이 클리닝 성능에 주요한 영향을 미치는 것을 보였다. Harpavat[7]는 비선형 빔 이론을 적용하여 블레이드 자유장과 블레이드 엣지(edge)의 변형에 대해서 기술하였다. 또한 블레이드 부재의 변형형상과 접촉부의 클리닝 각에 대해 구체적으로 기술하고 클리닝 성능과의 관계에 대해 기술하였다. Meyer[8]는 블레이드 닙(nip) 부분에 토너와 클리닝 블레이드 역학 관계에 대해 고찰하였다. Seino[9] 등은 블레이드의 stick-slip 에 의해 발생하는 블레이드 엣지의 마모와 성능에 대

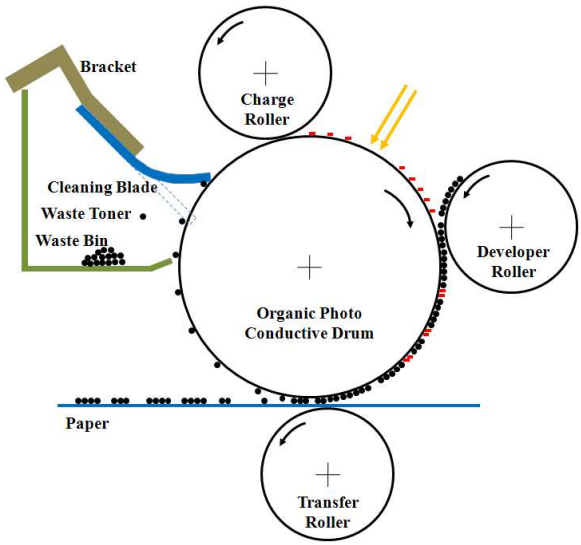


Fig. 1 Toner cartridge system of a laser printer

한 우레탄 블레이드 피로시험에 있어서 응력을 줄이는 것이 블레이드의 피로에도 유리하다는 것을 보였다. 이상 언급된 기존 연구에서는 클리닝 블레이드 소재 및 형상 파라미터와 클리닝 성능과의 관계만을 주요 연구대상으로 하였으며, 클리닝 블레이드의 영구변형 및 응력을 고려한 해석 및 최적설계 관련 연구는 수행되지 않았다.

본 연구에서는 클리닝 블레이드의 영구변형 위험을 감소시키고 수명을 향상시키기 위해 클리닝 블레이드에 발생하는 응력을 설계 기준으로 하였다. 클리닝 블레이드에 발생하는 최대응력을 최소화하는 최적설계를 위해 클리닝 성능과 부품간의 간섭을 구속조건으로 고려하였으며, 클리닝 블레이드의 형상 파라미터(shape parameter)와 설치각(setting angle)을 설계변수로 선정하였다. 클리닝 블레이드의 형상 파라미터와 설치각을 설계변수로 사용하기 위해 HyperMesh(ver. 10.0)를 이용하여 클리닝 블레이드의 파라메트릭 유한요소모델을 생성하였으며, Abaqus(ver. 6.8)를 이용하여 클리닝 블레이드와 감광드럼의 접촉을 고려한 구조해석을 수행하였다. 효율적인 설계를 위해 상용 PIDO 툴인 PIAnO 를 이용하여 구조해석절차를 통합하고 자동화하였다. 최적설계를 위해 PIAnO 에서 제공하는 다양한 설계기법을 이용하였다. 실험계획법 중의 하나인 최적라틴방격추출법(Optimal Latin Hypercube Design; OLHD)[10]을 이용하여 전산실험을 계획하고, 실험계획에 따라 클리닝 블레이드의 구조해석을 수행하였다. 그리고 각 실험점에 따른 구조해석 결과를 바탕으로 성능지수들의 근사모델로 크리깅 모델(Kriging model)[11]을 생성하였으며, 전역최적점(global optimal point)를 찾기 위해 진화알고리즘(Evolutionary Algorithm; EA)[12]을 이용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 설계요구사항과 설계변수를 바탕으로 설계문제를 정식화한다. 3 장에서는 클리닝 블레이드의 유한요소 모델링 및 구조해석 절차에 대해 기술하며, 4 장에서는 PIDO 툴을 이용한 해석절차 통합 및 자동화에 대해 설명한다. 5 장에서는 최적설계에 사용된 실험계획법과 근사화기법, 최적화 알고리즘에 대해 설명한 후 최적설계 결과를 기술하며, 6 장에서 연구 결과를 요약한다.

2. 설계문제 정식화

2.1 설계요구사항

클리닝 블레이드에 발생하는 최대응력을 최소화하기 위한 설계요구사항은 다음과 같다.

2.1.1 클리닝 블레이드의 최대응력 최소화

클리닝 블레이드의 영구변형 위험을 줄이고 피로수명을 향상시키기 위해 클리닝 블레이드에 발생하는 최대응력은 최소화되어야 하며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize} \quad \sigma_{\max} \tag{1}$$

식 (1)에서 $\sigma_{\max}$ 는 MPa 단위의 클리닝 블레이드에 발생하는 최대응력이다.

2.1.2 클리닝 블레이드의 선압 유지

클리닝 블레이드는 감광드럼 표면에 일정 압력으로 접촉하면서 변형된 형상을 유지하게 된다. 블레이드의 전체 길이에 걸쳐 작용하는 힘을 접지길이로 나눈 단위 길이당 하중을 선압(nip pressure)이라고 하며, 선압은 클리닝 성능을 평가하는 중요한 설계 기준이다. 따라서 gf/cm 단위의 선압(P_N)은 클리닝 블레이드 설계 기준에서 제시하는 허용 범위 내에 들어야 하며, 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$P_{N_L} \le P_N \le P_{N_U} \tag{2}$$

식 (2)에서 하한값(P_{N_L})과 상한값(P_{N_U})은 각각 20 gf/cm 와 40 gf/cm 이다.

2.1.3 클리닝 블레이드의 선접촉 유지

클리닝 블레이드는 감광드럼 표면에 선접촉을 하여야 클리닝 성능을 유지할 수 있다. 선접촉을 유지하기 위해 Fig. 2 에서와 같이 감광드럼 중심(O_{OPC})에서부터 클리닝 블레이드의 접촉점(N_{CT}) 위치 간의 거리($D_{CT\text{-}OPC}$)가 허용범위 내에 들도록 하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$R_{OPC} \le D_{CT-OPC} \le R_{OPC} + M_{CT-OPC} \tag{3}$$

식 (3)에서 R_{OPC} 는 감광드럼의 반지름으로 15.007 mm 이며, $M_{CT\text{-}OPC}$ 는 클리닝 블레이드 접촉점과 감광드럼 표면 사이의 거리로서 선접촉이 되도록 하는 허용값으로 본 논문에서는 0.03 mm 로 설정하였다.

2.1.4 클리닝 블레이드와 대전롤러의 간섭 방지

클리닝 블레이드의 형상과 설치각이 변함으로써 발생할 수 있는 클리닝 블레이드와 대전롤러 간의 간섭이 고려되어야 한다. 이를 위해 Fig. 2 에서와

Table 1 Initial, lower and upper limit values of the design variables selected

Design variable		Lower bound	Initial	Upper bound
x_1	T_{BL} (mm)	0.80	0.80	1.00
x_2	L_{FXBL} (mm)	5.00	7.40	7.40
x_3	A_{BL} (degree)	43.86	44.86	53.02
x_4	L_{BL} (mm)	14.50	14.78	17.00

같이 대전롤러 중심(O_{CR})으로부터 클리닝 블레이드의 상단점(N_{BL})까지의 거리($D_{BL\text{-}CR}$)가 하한값보다 크도록 하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$R_{CR} + M_{BL-CR} \le D_{BL-CR} \tag{4}$$

식 (4)에서 R_{CR} 은 대전롤러의 반지름으로 8 mm 이며, $M_{BL\text{-}CR}$ 는 클리닝 블레이드 상단점과 대전롤러 표면 간의 간섭이 발생하지 않도록 하는 여유값으로서 본 논문에서는 1 mm 로 설정하였다.

2.1.5 브라켓과 대전롤러의 간섭 방지

브라켓과 대전롤러 간의 간섭이 고려되어야 한다. 이를 위해 Fig. 2 에서와 같이 대전롤러 중심(O_{CR})에서부터 브라켓 상단점(N_{BK})까지의 거리($D_{BK\text{-}CR}$)가 하한값보다 크도록 하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$R_{CR} + M_{BK-CR} \le D_{BK-CR} \tag{5}$$

식 (5)에서 R_{CR} 은 대전롤러의 반지름으로 8 mm 이며, $M_{BK\text{-}CR}$ 는 브라켓 상단점과 대전롤러 표면 간의 간섭이 발생하지 않도록 하는 여유값으로서 본 논문에서는 1 mm 로 설정하였다.

2.2 설계변수

클리닝 블레이드의 최대응력에 영향이 많을 것으로 판단되는 클리닝 블레이드의 형상 파라미터와 설치각을 설계변수로 선정하였다. Fig. 3 에서와 같이 첫 번째 설계변수는 클리닝 블레이드의 두께(T_{BL})이며, 두 번째는 브라켓에 고정된 클리닝 블레이드의 고정단 길이(L_{FXBL}), 세 번째는 고정점(N_{FX})을 중심으로 회전하는 클리닝 블레이드의 설치각(A_{BL}), 네 번째는 클리닝 블레이드의 고정단과 자유단을 포함하는 클리닝 블레이드 전체 길이(L_{BL})이다. 설계변수의 초기값과 하한값, 상한값은 Table 1 과 같다.

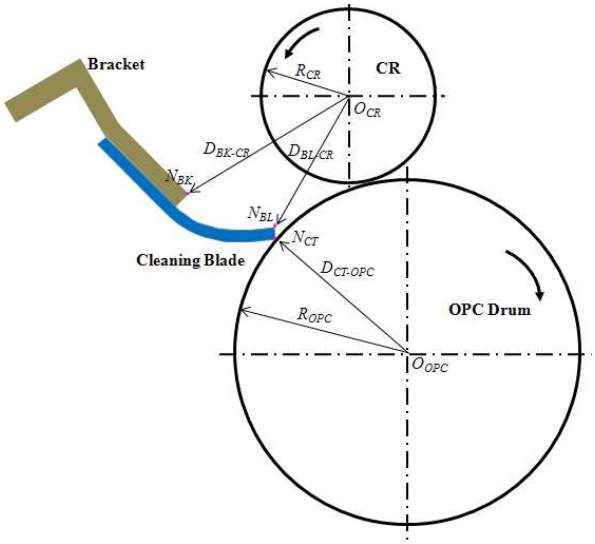


Fig. 2 Design constraints

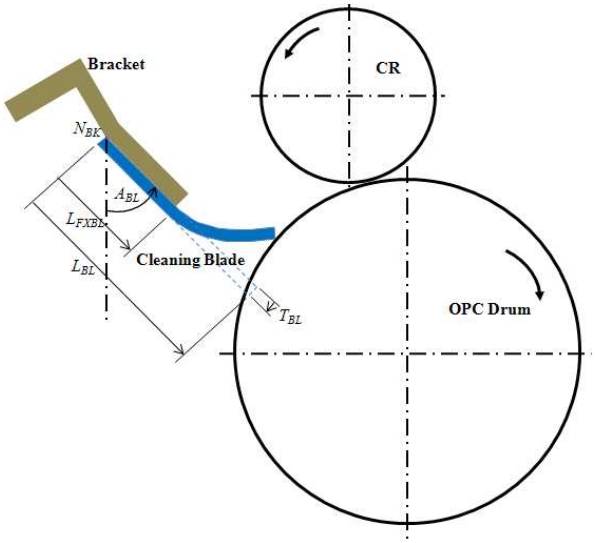


Fig. 3 Design variables

2.3 설계문제 정식화

주어진 모든 설계요구사항을 만족하는 설계변수를 찾기 위한 설계문제를 정식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
&\text{Find} && x_1, x_2, x_3, x_4 \\
&\text{to minimize} && \sigma_{\max} \\
&\text{subject to} && P_{N_L} \le P_N \le P_{N_U} \\
& && R_{OPC} \le D_{CT-OPC} \le R_{OPC} + M_{CT-OPC} \\
& && R_{CR} + M_{BL-CR} \le D_{BL-CR} \\
& && R_{CR} + M_{BK-CR} \le D_{BK-CR}
\end{aligned} \tag{6}$$

3. 구조해석 절차

3.1 파라메트릭 유한요소 모델링

클리닝 블레이드의 구조해석을 위해 유한요소모델이 필요하며, 유한요소모델 생성시 브라켓에 고정된 클리닝 블레이드의 자유단이 감광드럼 표면에 접촉하는 실제 조립조건을 고려하여야 한다. 따라서 클리닝 블레이드 유한요소모델은 HyperMesh 에서 80 개의 S4 shell 요소로 구성되며, 설계기준에서 제시하는 탄성계수를 물성치로 사용하였다. 또한 감광드럼은 알루미늄 재질의 S4 shell 요소로 모델링 되었다.

본 논문에서는 클리닝 블레이드의 형상 파라미터와 설치각을 설계변수로 선정하였으므로 클리닝 블레이드는 파라메트릭하게 모델링 되어야 한다. 파라메트릭 유한요소모델은 HyperMesh 에서 형상 파라미터의 변경에 따라 클리닝 블레이드의 유한요소모델을 스케일링(scaling)하고, 설치각 변경에 따라 유한요소를 회전하는 방법을 이용하였다.

3.2 클리닝 블레이드의 구조해석

형상 파라미터와 설치각이 변경된 클리닝 블레이드의 파라메트릭 유한요소모델과 감광드럼 유한요소모델, 물성치, 하중조건, 경계조건 등의 정보는 HyperMesh 에서 Abaqus 의 입력파일(*.inp)로 출력되며, Abaqus 에서는 이 입력파일을 이용하여 감광드럼과의 접촉을 고려한 클리닝 블레이드의 구조해석을 수행한다. 구조해석 수행 후 출력되는 Abaqus 결과파일(*.dat)에 기록된 클리닝 블레이드의 최대응력과 선압, 거리 계산을 위한 노드들의 좌표 정보 등은 PIAnO 에서 최적설계를 위한 목적함수와 구속조건 계산에 이용된다.

4. 해석절차 통합 및 자동화

HyperMesh 와 Abaqus 간의 효율적인 데이터 처리와 해석 프로세스 정립을 위해 구조해석절차의 통합이 필요하다. 또한 제품 설계에 소요되는 시간을 단축하기 위해 수작업으로 진행되던 구조해석절차의 자동화가 필요하다. 특히 반복과정이 필요한 최적설계의 경우 해석절차의 자동화는 필수적이라 할 수 있다. 하지만 경우에 따라 상용 툴의 특성상 해석절차의 통합 및 자동화 구현이 어렵거나 구성에 상당한 시간과 노력이 요구될 수도 있다. 그러나 해석절차의 통합 및 자동화가 구현되면 설계 변경에 따른 성능 예측이 간편해질 뿐만 아니라 설계 특성에 따라 실험계획법이나 최적설계, 신뢰성 해석 등의 다양한 설계 기법을 손쉽게 적용할 수 있다. 또한 해석절차의 통합 및 자동화에 따른 경험적 지식은 다른 제품의 설계에도 효과적으로 활용될 수 있다.

본 논문에서는 PIAnO 의 파일 파싱(file parsing) 기법을 이용하여 구조해석절차를 통합하고 배치런(batch run)을 이용하여 자동화하였다. 통합된 해석절차의 1 회 해석시간(CPU time)은 Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q6600 2.4GHz, 3.5GB RAM 사양의 해석용 컴퓨터에서 약 22 초 정도 소요된다.

5. 클리닝 블레이드의 최적설계

본 과제 수행을 위해 클리닝 블레이드의 구조해석절차를 통합하고 자동화하였다. 하지만 본 논문에서는 최적설계 수행에 있어서 통합되고 자동화된 구조해석절차를 직접 사용하지 않고 성능지수들의 근사모델을 사용하였다. 근사모델을 사용한 이유는 개별 설계변수들의 범위를 적절하게 설정하였다고 하더라도 설계변수들의 일부 조합에 따라 Abaqus 를 이용한 구조해석이 정상적으로 수행되지 못할 수도 있기 때문이다. 이러한 경우, 구조해석 결과로부터 목적함수와 구속조건을 계산하기 위한 성능지수들의 정보를 얻지 못하게 되고 데이터의 연결이 끊어져 다음의 설계점을 찾지 못해 결국 최적설계가 비정상적으로 중단된다. 실제로 통합된 구조해석절차에 직접 최적화 알고리즘을 적용한 결과, 최적설계 도중 비정상적으로 중단되는 경우를 확인하였다. 해석이 정상적으로 수행되지 못한 경우는 설계변수의 조합에 따라 형상이 변경된 클리닝 블레이드가 감광드럼 표면에 접촉을 하지 못하고 미끄러짐이 발생한 경우 등이었다.

따라서 본 연구에서는 최적설계의 원활한 수행을 위해 실험계획에 따라 전산실험을 수행하고 정상적으로 해석된 결과로부터 근사모델을 생성하여 근사모델을 이용한 최적설계를 수행하였다. 본 장에서는 클리닝 블레이드의 최적설계를 위해 사용한 실험계획법과 근사화기법, 최적화 알고리즘에 대해 설명하고 최적설계 결과를 기술한다.

5.1 실험계획법

본 논문에서는 PIAnO 에서 제공하는 실험계획법 중의 하나인 최적라틴방격추출법을 이용하였다. 기존의 라틴방격추출법(Latin Hypercube Design; LHD)은 경우에 따라 충진성능(space-filling)이 나빠질 수 있기 때문에 충진성능을 향상시킨 최적라틴방격추출법을 사용함으로써 최적성조건을 만족하는 실험점을 추출한다.

1 회 해석 시간과 해석 실패가 발생할 수 있는 경우를 감안하여 충분한 실험횟수로 판단되는 400 개의 실험점을 생성하였다. 전산실험 결과, 해석 실패인 경우가 13 회 발생하였고, 구조해석이 정상적으로 수행된 387 개의 실험점만을 사용하여 근사모델을 생성하였다. 근사모델은 해석모델의 반응값과 변수값과의 관계를 근사화한 수치모델이므로 최적설계 도중 해석 실패는 발생하지 않는다.

5.2 근사화기법

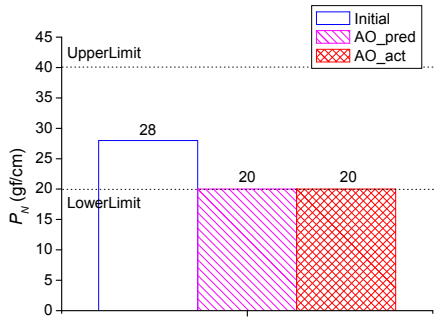
근사모델은 관심영역의 일부 또는 전체 영역 내에서 실제 해석모델의 반응값과 변수값과의 관계를 근사화 한다. 본 논문에서는 PIAnO 에서 제공하는 다양한 근사모델 중 하나인 크리깅 모델을 선정하였다. 크리깅 모델을 선정한 이유는 설계변수들의 변화에 따른 성능지수들의 경향성을 살펴보기 위한 파라메트릭 스터디(parametric study) 결과가 비선형적인 경향성을 보였기 때문이다.

대표적인 보간모델인 크리깅 모델은 1951 년 채광학자인 Krige[11]의 연구를 바탕으로 이후 수학 및 공학분야에 적용되었으며, 1998 년 Simpson[13]은 여러 근사모델들과의 비교연구를 통해 크리깅 모델이 설계변수가 많고 비선형성이 강한 시스템에서 예측성능이 우수함을 보였다. 또한 크리깅 모델은 통계적 추정치를 제공해 주고, 최우량추정법(Maximum Likelyhood Estimation; MLE)을 통해 파라미터를 최적화하기 때문에 사용자의 경험이나 직관에 의존하는 사용자 지정 파라메터는 존재하지 않는다.

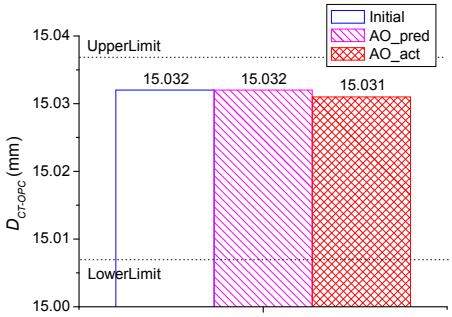
5.3 최적화 알고리즘

본 논문에서는 최적화기법으로 PIAnO 에서 제공하는 진화알고리즘을 선정하였다. 진화알고리즘은 전역 최적화기법 중의 하나로, 1975 년 John H. Holland[12]에 의해 제안되었다. 이 알고리즘은 생물의 진화과정을 묘사한 유전연산자들을 가지고 있어 선택(selection) 및 재조합(recombination), 돌연변이(mutation) 등의 과정을 거쳐 전역해를 탐색하게 된다. 또한 이산형 변수를 효과적으로 다룰 수 있으며, 함수의 민감도를 요구하지 않기 때문에 함수 형태와 상관없이 적용할 수 있다.

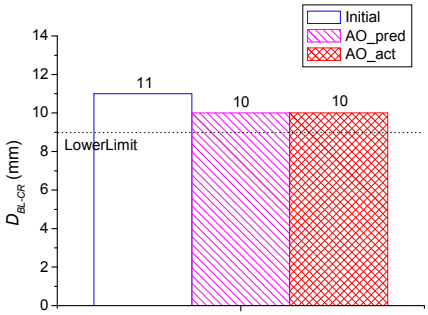
하지만 진화알고리즘은 기타 최적화 알고리즘에 비해 비교적 함수 계산을 많이 하기 때문에 해석모델에 따라 최적설계에 많은 시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다.[14] 비록 진화알고리즘이 함수 계산이 많은 단점이 있지만 본 논문에서는 실제



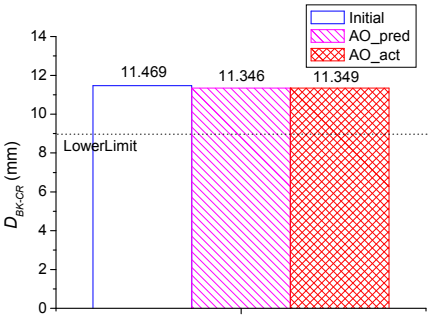
(a) Nip pressure



(b) Distance between the contact point of cleaning blade and the center point of OPC drum



(c) Distance between the top point of cleaning blade and the center point of CR



(d) Distance between the top point of steel bracket and the center point of CR

Fig. 4 Comparison of the design constraints

해석모델 대신 해석시간이 짧은 근사모델을 사용하기 때문에 진화알고리즘의 단점을 보완할 수

Table 2 Initial and optimal design variable values

Design variable		Lower bound	Initial	Optimal	Upper bound
x_1	T_{BL} (mm)	0.80	0.80	0.88	1.00
x_2	L_{FXBL} (mm)	5.00	7.40	5.62	7.40
x_3	A_{BL} (degree)	43.86	44.86	49.92	53.02
x_4	L_{BL} (mm)	14.50	14.78	14.55	17.00

있다. 통합된 해석 절차의 1 회 해석시간은 약 22 초이지만 크리깅 모델은 약 8 초 정도가 소요된다.

5.4 최적설계 결과

본 논문에서는 근사모델을 이용한 최적설계를 수행하였다. 따라서 크리깅 모델의 정확도에 따라 최적설계 결과가 달라질 수 있으므로 최적설계 결과의 정확도를 검증하여야 한다. 이를 위해 크리깅 모델을 이용한 최적설계 결과(AO_pred)와 최적설계변수값에서의 Abaqus 해석 결과(AO_act)를 서로 비교하였다.

구속조건 만족여부를 초기값과 비교하여 Fig. 4(a)~(d)에 나타내었다. 비교 결과, AO_pred 와 AO_act 모두 주어진 구속조건을 만족한 것을 볼 수 있었으며, AO_pred 와 AO_act 결과가 서로 유사함으로 보아 크리깅 모델이 실제 해석 결과를 잘 예측하는 것을 확인할 수 있었다.

목적함수의 비교를 위해 AO_pred 와 AO_act 의 최대응력을 초기값과 비교하여 Fig. 5 에서 나타내었다. AO_pred 의 최대응력은 초기모델에 비해 31.9% 감소한 0.605MPa 이었으며, AO_act 또한 최대응력 최대응력이 32.6% 감소한 0.6MPa 임을 확인하여 크리깅 모델을 이용한 최적설계 결과의 유효성을 확인 할 수 있었다.

최적 설계변수값을 초기값과 하한값, 상한값과 비교하여 Table 2 에 나타내었다. 최대응력을 감소시키기 위해서는 초기 모델에 비해 클리닝 블레이드의 두께(T_{BL})는 두꺼워져야 하고, 설치각(A_{BL})은 증가되어야 하며, 고정단 길이(L_{FXBL})는 짧아지되 자유단 길이가 늘어나 결국 클리닝 블레이드의 전체길이(L_{BL})는 거의 변화가 없어야 한다는 것을 알 수 있었다.

설계변수 변경에 따른 클리닝 블레이드의 형상과 최대응력 발생 지점을 초기형상과 비교하여 Fig. 6 에 나타내었다. 최대응력은 브라켓에 고정된

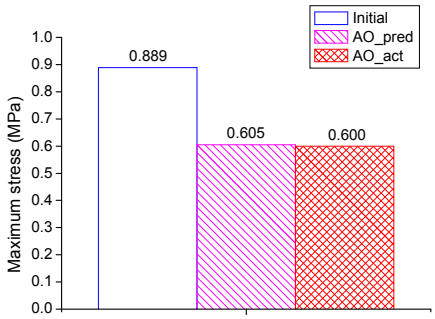
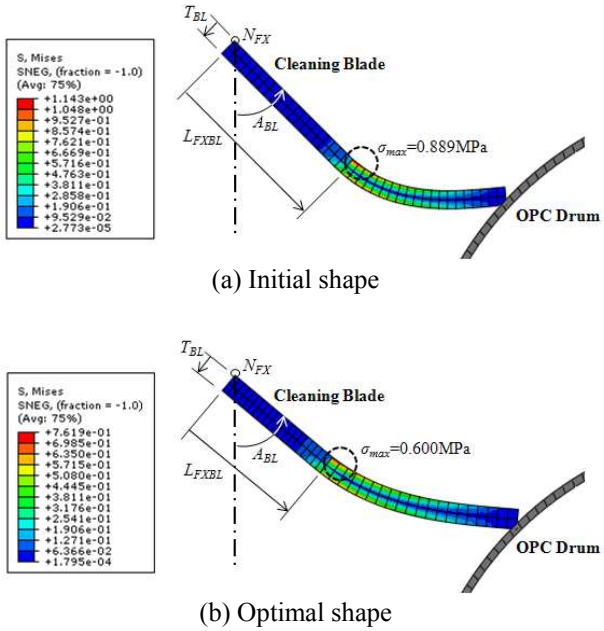


Fig. 5 Comparison of the objective functions



(a) Initial shape

(b) Optimal shape

Fig. 6 Comparison of cleaning blade shapes

고정단과 자유단 연결 부위에서 발생하며, 변형정도에 따라 최대응력에 차이가 나는 것을 볼 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 신규 적용된 트레일링 방식 클리닝 블레이드의 최대응력을 최소화하기 위한 최적설계를 수행하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

(1) 설계요구사항을 바탕으로 클리닝 성능과 부품간의 간섭을 동시에 고려하면서 최대응력을 최소화할 수 있는 설계문제를 정식화 하였다.

(2) HyperMesh 를 이용하여 클리닝 블레이드의 파라메트릭 유한요소모델을 생성하고, Abaqus 를 이용한 구조해석절차를 정립하였으며, 상용 PIDO

툴인 PIAnO 를 이용하여 구조해석절차를 통합하고 자동화하였다.

(3) PIAnO 에서 제공하는 실험계획법인 최적라틴방격추출법과 근사모델인 크리깅 모델, 전역최적화기법인 진화알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 그 결과 주어진 모든 구속조건을 만족하면서 초기 대비 최대응력이 32.6% 감소한 최적의 클리닝 블레이드 설계안을 도출하여 본 연구에서 수행한 최적설계 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

향후에는 우레탄 고무의 비선형성을 고려한 물성 평가와 영구변형과 응력과의 상관관계 규명을 위한 시험 등이 수행되어야 할 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 2010 년도 두뇌한국 21 사업과 삼성전자㈜에 의하여 지원되었으며, 이 연구를 위하여 PIDO 툴인 PIAnO 소프트웨어를 제공한 ㈜프레이맥스에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Takahasi, T., 1977, *Cleaning Device for Use in Electrophotographic Copying Apparatus*, U.S Patent 4026648.

(2) Schein, L. B., 2003, *Electrophtography and Development Physics*, Laplacian Press.

(3) Royka, L. B. and Emerald, R. L, 1971, *Lubricated Blade Cleaning of Imaging Photoconductive Member*, U.S Patent 3552850.

(4) Gerbasi, D. P., 1972, *Cleaning Apparatus*, U.S Patent 3660863.

(5) Till, H. R., 1973, *Wiper Blade Cleaning for Xerographic Machines*, U.S Patent 3724220.

(6) Till, H. R. and Lindblad, N. R., 1976, "Parametric Study of a Xerographic Cleaning Blade," *Conf. Rec., Annu. Meet. IEEE Ind..*, Vol. 20, No. 5, pp. 449~464.

(7) Harpavat, G. L., 1979, "A Theoretical Study of the Mechanics of a Xerographic Cleaning Blade," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-15, No. 6, pp. 681~687.

(8) Meyer, R. J., 2000, "Theory of Blade Cleaning," *Int. Conf. on Digital Printing Technologies*, pp. 846~850.

(9) Seino, K. and Yuge, S., 1985, "Wear Characteristics and Cleaning Ability of Cleaning Blades," *JIST*, Vol. 47, No. 5, pp. 424~433.

(10) Park, J. S., 1994, "Optimal Latin-Hypercube Designs for Computer Experiments," *J. Statist. Plann. Inference*, Vol. 39, pp. 95~111.

(11) Krige, D. G., 1951, "A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand," *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*, Vol. 52, No. 6, pp. 119~139.

(12) Holland, J. H., 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press.

(13) Simpson, T. W., Korte, J. J., Mauery, T. M. and Mistree, F., 1998, "Comparisons of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization," *Proc. 7th AIAA/USAF/NASA/ ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis & Optimization*, Vol. 1, pp. 381~391.

(14) Haupt, R. L. and Haupt, S. E., 1998, *Practical Evolutionary Algorithms*, Wiley.