

박판판재 경화를 고려한 다이 캠 드라이브의 구조해석 최적화에 대한연구

이종배¹, 김선삼¹, 우창기^{*}
¹인천대학교 기계공학

A Study on the Structure Analysis Optimization of Die Cam Drive Considering the Thin Plate Hardening.

Jong-Bae Lee¹, Seon-Sam Kim¹, Chang-Ki Woo^{*}

¹Div. of Mechanical Engineering, Incheon National University

요약 프레스 가공에서 포밍이나 굽힘 등의 변형에 따라 판재는 가공경화를 발생하게 되며, 판재 경화와 가스 스프링 반력에 의한 캠 성형 과정에서 캠 및 판재의 변형과 미 성형이 발생하게 된다. 본 연구는 알루미늄 판재 성형 과정에서 판재 경화를 고려한 응력, 변형이 주어진 판재 물성치와 캠 성형 압력에 맞게 입력 값으로 처리하였다. 그리고 유한요소 해석틀인 Hyperstudy와 Abaqus 연동으로 캠 형상을 비선형적으로 형상 최적화 해석을 수행 했다. 그 결과 판재의 변형이 제거 되면서 허용되는 최대, 최소 응력 범위와 최소 변형을 갖는 조건하에서 캠 형상을 최적화 하였다. 따라서 해석 결과를 통해 응력-변형 곡선과 응력-두께의 정규 분포도를 얻을 수 있었고, 또한 Iteration 처리로 판재 경화와 가스 스프링 반력을 고려한 다이캠 두께에 맞는 응력과 변형에 대한 최적화 형상을 얻을 수 있었다.

Abstract According to the forming or bending deformation in the press die, the thin plate occurs a work-hardening, the sheet hardening and cam unit's deformation causes incomplete forming during the cam molding process by the reacting spring forces. This study treated the input parameters of the stress and strain as given properties and also used Cam forming pressure considering the sheet hardening in the forming process of the aluminum sheet. The Hyperstudy are operated be linked with the Abaqus of the finite element analysis tool and the shape of Cam were carried out with non-linear shape optimization analysis. As a result removing the deformation of plate, the cam shape were optimized under conditions reduced deformation, having a minimum stress range and the minimum deformation. Therefore, a stress-strain curve and a normal distribution of stress-thickness can be obtained and optimization could be obtained for the shape of the stress and strain on the die plate hardened cam considering the thickness and reaction force of gas spring as iteration process.

Keywords : Deformation, Hardened, Non-linear, Optimization, Strain, Stress

1. 서론

최적설계란 구조설계의 제반 요소를 분석, 정리해서 수리적 계획 문제를 모형화하고 수치적 최적화 방법을 적용하여 설계변수와 해석변수에 부과된 제약조건을 동시에 만족하면서 목적함수를 최소로 하는 설계변수의 조

합으로 수학적 최적화기법에 의하여 값을 구하는 설계법 이라고 할 수 있다[1]. 따라서 본 연구에서는 4개의 부품으로 이루어진 프레스 금형인 측면 캠 다이로 캠 성형의 경우 판재 알루미늄과 정상적으로 성형이 그림 Fig. 1과 같이 캠 펀치와 판재가 밀착되어 성형된다. 따라서 판재의 경화현상과 다이 캠의 반력역할을 하는 가스 스프링

*Corresponding Author : Chang-Ki Woo(Incheon National University)

Tel: +82-10-3785-7997 email: woerwck@naver.com

Received July 16, 2015

Revised (1st August 21, 2015, 2nd September 10, 2015)

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

을 부가적으로 추가 했을 경우에 캠(Cam) 펀치가 변형되었다. 일반적인 판재의 경우 하드닝(Hardening)을 풀림처리 해서 성형하거나 아니면 열간 성형을 해야 경화 현상을 방지할 수 있다[2]. 이러한 경화 현상을 고려하여 풀림이나 열간성형을 고려하지 않고 허용되는 압력과 주어진 부피 범위에서 최적화를 활용해서 변형되는 캠 두께를 응력과 변위에 따라 최적화로 경화현상의 변형을 방지하는 가장 이상적인 결과를 만들어서 초기모델과 최적화된 모델을 각각의 형상부피와 응력과 변형을 비교 분석하여 그 결과를 최종적인 해석모델로 선택하는 최적화 해석문제를 연구하고자 한다.

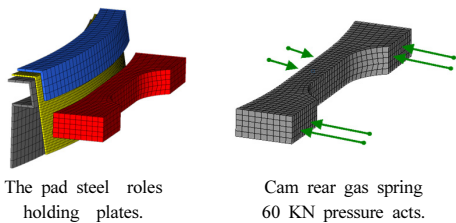


Fig. 1. Boundary conditions of the optimization model cam

2. 본론

2.1 해석 모델의 특징

상형은 판재를 잡아주는 블랭크홀더 역할을 한다. 물성치는 철(Steel)로 지정하고 판재는 0.6mm인 알루미늄 판재로 했다. 하형 다이는 리지드바디(Rigidbody)로 처리했다. 캠(Cam) 드라이브는 펀치 및 드라이브 역할을 동시에 하고 물성치를 알루미늄으로 설정했다. 그리고 캠의 작동 방향은 -X 방향으로 100KN으로 압력을 받아서 움직이고 반력은 그림과 같이 의 화살표와 같이 60KN의 반력이 작용하도록 했다. 캠의 요소망(Element) 크기는 2mm인 hexa 요소망으로 만들었다.

2.2 해석이론

2.2.1 비선형 해석 이론적 배경

Explicit 과도 동적해석에 의해 해결 운동의 기본 방정식은

$$m\ddot{x} + \dot{c}\dot{x} + kx = F(t)$$

으로 표현되며 m은 질량 행렬이고, C는 감쇠 행렬, K는 강성 행렬이다. 그리고 F (t)는 하중 벡터이다. F (t)에서

주어진 시간(t) 방정식은 관성력과 제동력을 고려 "정적" 평형 방정식의 집합으로 생각할 수 있다. 연속적인 시점 사이의 시간 증가는 적분시간 스텝이다[3].

Explicit 자동 증분시간의 증분크기는

$$\Delta t_{\min} \leq \frac{2}{w_{\max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi)$$

$$\Delta t \leq \frac{L^e}{c_d} \quad c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

모델의 고유치 고차모드 임계 감쇠비의 향으로 주어진다. 안정성 한계 값은 "Stable time increment"를 감소시킨다. 요소크기 L^e 과 동 속도 C_d,

Explicit 속도와 변위 이론은

$$\ddot{u}|_{(t)} = M^{-1} \cdot (P - 1)|_{(t)}$$

와 같이 표현되며 t + Δt에서 속도와 변위가 외연적으로 업데이트 된다. 외력:P 내력: I 구조물의 가속도: \ddot{u} 해는 간단하고 조건이 맞으면 해는 안정적이다. 불연속적인 비선형 형태는 Explicit 방법으로 쉽게 다룰 수 있다[4].

2.2.2 Hyperstudy 이론적 배경

최적화 정식화의 목적함수 질량과 부피를 최적화 볼륨이나, 응력 값을 최적화 하였다. 또한 제약조건, 밀도나 치수, 형상에 미칠 변수 등을 고려하였다. 최대응력이 조건 설계변수 Design variable 최적화 하면서 측면 캠 드라이브가 최대 변위가 20mm이상 발생하지 말아라라는 것과 제약조건이 Constrains 값 120MPa 이상 발생하지 말라는 것을 제한하는 것이고, 또한 등가 응력보다 초과되는 부분을 제한하는 것이다.

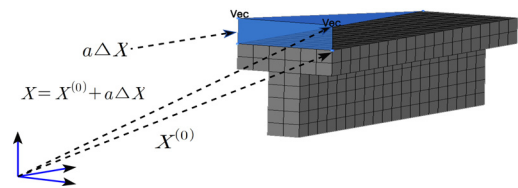


Fig. 2. Shape optimization rationale

Fig. 2 모델은 하나의 형상 변수에 의한 하나의 노드가 이동하는 것을 최적화 과정으로 설명하는 것이다. 그

이론식은 아래와 같이 식으로 표현할 수 있다[5].

Original location: $X^{(0)} = \{X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, \dots, X_n^{(0)}\}$

Shape: $\Delta X = \{\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \dots, \Delta X_n\}$

Design variable: $a = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$

Mesh nodal movement: $X = X^{(0)} + \sum_{j=1}^n a_j \Delta X_j$

최적화 기반으로 설계가 진행됨에 따라, 변형이 포함될 설계 문제에 대한 해결은 더욱 중요 해지게 된다. 따라서 최적의 설계에서 제약 없이 가장 안전하게 만족되면서, 실패의 댓가가 큰 경우 중요한 변화에 대한 신뢰성과 견고성이 요구될 때 변이 변동을 감소시키고 신뢰를 향상시키기 위해 통계적인 방법으로 사용되는 스토캐스틱(Stochastics) 최적화 방식으로 수행 했다[6].

2.3 재료 물성

2.3.1 Aluminum hardening 이론적 배경

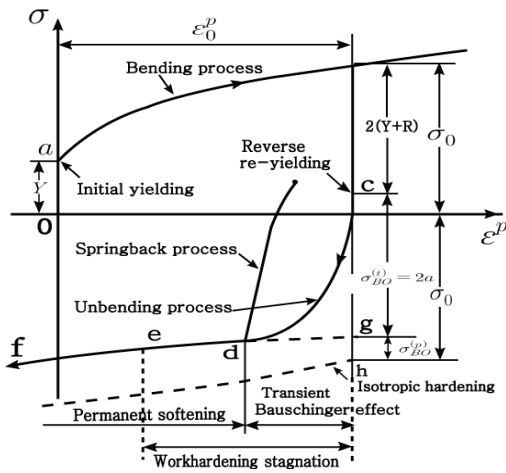


Fig. 3. Cyclic tension - compression at large strain, Bauschinger effect

Fig. 3에서 과도연화로 인해 바우싱거 효과 및 동적경화, 변형률 증가 영률저하, 또한 스트레스 반전 등이 동시에 나타난다. 플랜지(Flange) 공정 중에 스프링백 탄성이 발생 하지만 일부의 경우에는 금속의 바우싱거효과로 인해 경화(Hardening) 거동이 적용 되었다[7]. 스프링백의 수치 결과를 바우싱거효과의 응력과 변형 응답의 두 가지 현상을 특징으로 한다. 하나는 응력반전 및 기타의

초기 단계에서 부드러운 과도응력과 변형률 응답인 과도연화 후 나타나는 영구연화를 개략적으로도 Fig. 3 에 도시했다.

2.3.2 Aluminum 판재 물성치

혼합 등방성 동적 경화 소성 가능성의 전형적인 구성적 모델에 의해 계산된 수치 응력과 변형 응답의 결과를 비교하여 대 변형 변형순환 탄소성에 대한 구성적인 모델링에 몇 가지 중요한 포인트를 Fig. 4에 나타내었다.

Frederik과 Armstrong(2007)은 비선형운동성 경화모델을 제시했다[8]. Fig.4와 같은 haboche 비선형 경화모델을 활용할 수 있다[9].

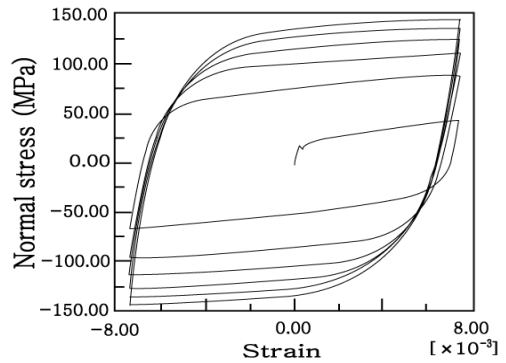


Fig. 4. Stress-strain data for a stabilized cycle

위의 판재 알루미늄 물성치를 Table 1에 표시했으며 그 결과 그래프를 Fig. 5로 나타내었다.

Table 1. Panel plastic cyclic hardening

	Equiv stress	Equiv plastic strain		Equiv stress	Equiv plastic strain
1	13.0	0.0	7	80.76	0.1428
2	13.0	0.0068	8	86.25	0.17
3	29.37	0.034	9	90.498	0.1972
4	50.13	0.0612	10	93.95	0.2244
5	63.91	0.0884	11	96.155	0.2516
6	73.01	0.1156			

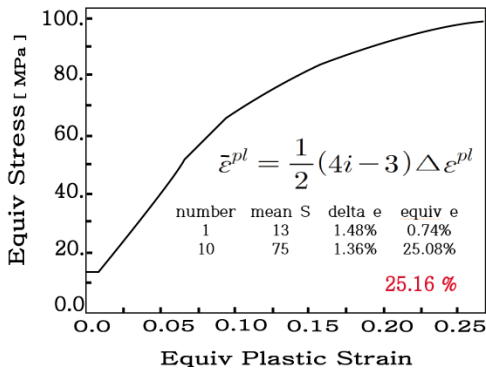


Fig. 5. Stress-strain data for a stabilized cycle

바우싱거효과인 소성 Cyclic hardening은 Fig. 4과 같이 표현하고 Low Cyclic 이론적 원리를 Fig. 6에 설명하였다.

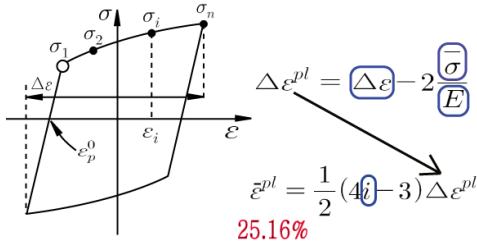


Fig. 6. Stress-strain data for a stabilized cycle

Fig. 6에서 25.16%는 Table 1에 있는 등방성 Strain 값이다. 또한 안정된 순환 Cycle를 만들기 위해서는 다음과 같은 Cyclic 방정식으로 표현 할 수가 있다.

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma - \alpha) \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\epsilon}^{pl} + \frac{1}{C} \alpha \dot{C}$$

상기 식에서, $\dot{\alpha}$ 는 후속응력 수, σ^0 초기항복응력, C 는 초기운동성 경화 계수, γ 는 소성변형 증가에 따른 운동성 경화감소 비를 나타낸다[10]. α 및 γ 은 플라스틱 경화 파라미터이고 $\dot{\epsilon}^{pl}$ 는 변형소성 부분이다. 실험에 의하면 등방성 응력 자체는 연속체의 소성변형을 일으키지 못한다. 따라서 소성변형을 일으키게 하는 것은 복잡한 응력상태에서 등방성 응력을 뺀 부분 편차응력이 한계 값에 이르면 소성변형이 일어난다. 알루미늄의 판재 물성치는 Fig. 7과 같이 소성영역의 그래프이다. 그 물성치는 Table 2에 표로 정리했고, 소성 Cyclic hardening은 Table 3과 같이 표로 정리했다. 그리고 판재의 밀도와 탄성계수, 프와송수는 Table 2에 정리했다.

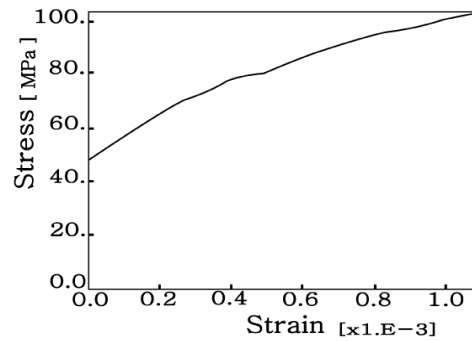


Fig. 7. Aluminum plastic panel graph

Table 2. Material properties

Division	Aluminum	Steel
Density	2.77E-09	7.8E-09
Young's Modulus	73100	210000
Poisson's Ratio	0.3	0.33

Table 3. Aluminum plastic panel

	Yield Stress	Plastic Strain		Yield Stress	Plastic Strain
1	46.94	0.0	10	82.886	5.5437E-04
2	52.044	5.0927E-05	11	85.974	6.1468E-04
3	56.826	1.0494E-04	12	88.91	6.9644E-04
4	61.273	1.6218E-04	13	91.647	7.6012E-04
5	65.813	2.1853E-04	14	94.363	8.3498E-04
6	69.556	2.7253E-04	15	96.266	9.2571E-04
7	72.703	3.4228E-04	16	99.02	9.9923E-04
8	76.541	3.9558E-04	17	100.99	10.803E-04
9	79.63	4.9568E-04			

2.3.3 캠 드라이브 물성치

Table 4를 캠 드라이브의 소성물성치를 그래프로 표현한 것이 Fig. 8 이다.

Table 4. Cam aluminum plastic property

	Yield Stress	Plastic Strain		Yield Stress	Plastic Strain
1	60	0.0	5	133	0.5
2	90	0.125	6	165	1
3	113	0.25	7	210	2
4	124	0.375	8	320	4

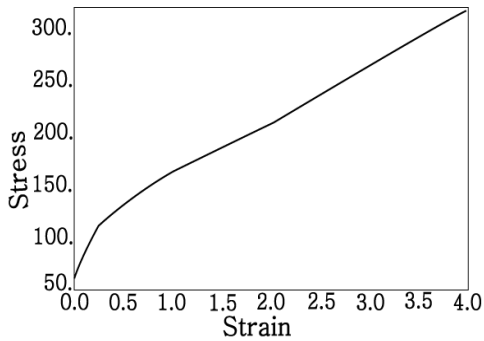


Fig. 8. Cam aluminum plastic property graph

2.4 해석방법

2.4.1 Hyperstudy Solving을 위한 Abaqus의 Interface 설정

Hyperstudy와 Abaqus 솔버를 Interface하고 1차 해석 결과를 통해 ODB 파일에서 데이터를 추출 하였다. CAE 모델과 같은 두께, 형상 설계변수, 재료속성은 모델출력 응답을 변경할 수 있다. DOE(Design of experiments)의 연구는 이러한 입력 요소와 출력에 미치는 영향 사이의 상호 작용에 대한 정보를 제공한다. DOE 실행이 완료되면, 제어 요소 현실에서 제어 할 수 있는 설계 변수생산 환경을 제공한다. 파라메트릭 스테디를 통해 설계변수 영향 도를 분석하였으며 수치적 분석을 통해 목적함수에 적합한 최적화 기법을 선정하였다.

Fig. 9를 통해 캐드로부터 모델을 Import해서 그림과 같이 순서대로 초기 해석을 수행해서 그 결과로 Inp파일을 얻을 수 있었다.

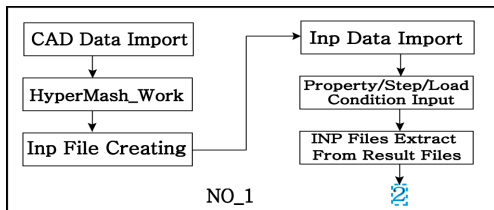


Fig. 9. Preceding steps for data processing

그 수행결과를 Fig. 10에 플로차트처럼 순서에 따라 진행하고 특히 목적함수를 모핑처리 해서 변수처리 했다.

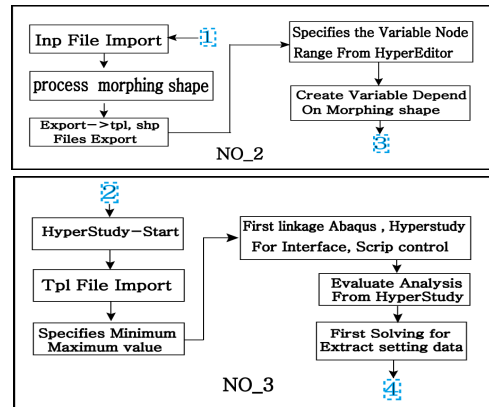


Fig. 10. Data processing step

Hypereditor상에서 형상변수들을 변수로 인식하도록 처리했고 그 결과를 Tpl 파일로 만들어서 Hyperstudy가 인식하도록 했다. 내부 알고리즘 방식은 파라메트릭 최적화 기법 선택해서 설계변수의 변화에 따른 응답의 경향을 파악하기 위해 먼저 DOE를 이용해서 민감도를 먼저 수행했다.

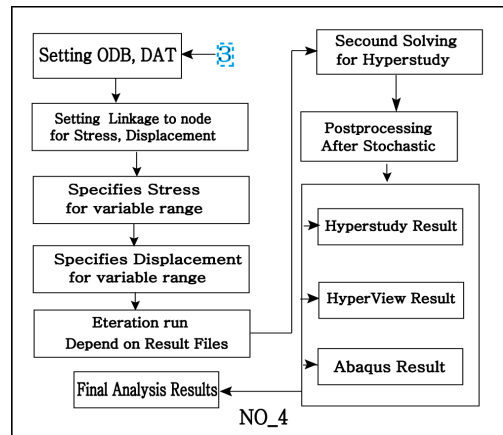


Fig. 11. Data results step

따라서 위의 알고리즘 중에 DOE를 수행해서 민감도를 분석하고 주어진 범위 안에서 변수를 랜덤하게 입력 처리 되는 스토캐틱방식에 따라 최종적으로 수행했다. 그 처리하는 알고리즘은 Fig. 12의 (c)와 같다.

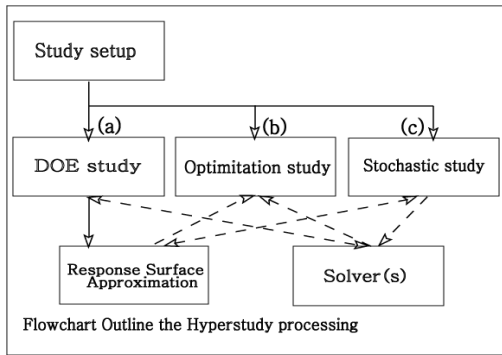


Fig. 12. Hyperstudy's internal algorithm principles

2.4.2 최적화 변수 선정방법

Fig. 13에서 플로차트 내의 (a)단계와 같이 모핑 알고리즘이 Fig. 14와 같이 설정 되면서 두께별, 스트레스별로 아래와 같은 순서에 따른다.

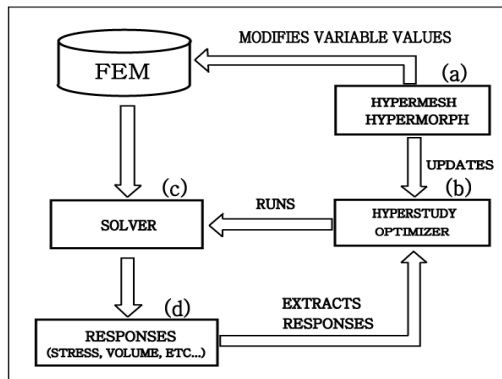


Fig. 13. Morphing algorithms stage role

2.4.3 Morphing 후에 변수발생 부분처리

모핑(Morphing) 변수로 될 수 있는 조건들은 질량, 스트레스, 변위, 주파수, 압력 강하, 제약 조건 등이 모핑 변수의 함수로 적용이 가능하다. 따라서 최적 설계목적 함수에서 원하지 않는 값은 최소화하고 동일한 시점 또는 디자인 시간은 모든 제약 조건을 만족시켜야 한다. Fig. 14에서 Hypereditor로 모핑변수 영역과 변수를 수정해서 새로운 tpl 파일로 저장하고 하이퍼스터디(Hyperstudy)로 진행하여 변수들의 영역을 지정해 주었다. 또한 변수 최대치와 최소치를 설정해주고, 하이퍼스터디를 실행하여 Hypereditor상에서 모핑 변수 처리한 결과물인 tpl 확장자로 생성된 파일을 불러 왔다.

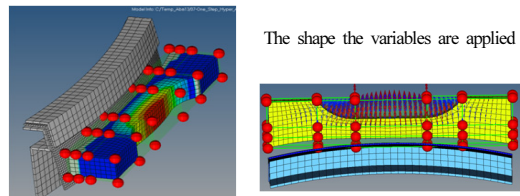


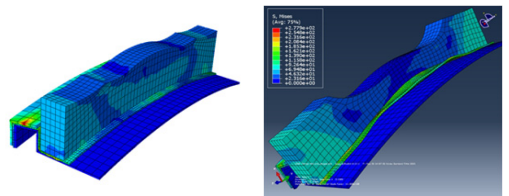
Fig. 14. Cam variable Sh1, Sh2, Sh3 setting

본 논문에서는 형상최적화를 위해 모핑용 변수를 Fig. 14와 같이 변수를 각각 Sh1, Sh2, Sh3로 설정했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 변수에 의한 2차 최적화 결과 및 고찰

Fig. 15에서 (a)는 순수 소성 영역에서 성형된 모습이고 (b)는 가스 스프링 적용으로 캠 드라이브 변형된 모습이고 또한 판재경화에 의한 캠 변형으로 판재 미 성형으로 인한 판재가 들뜬 상태의 변형된 모습이다.



(a) Pure plastic zone (b) The plate applied the Hardening
Fig. 15. Pure plastic sheet is applied and hardening

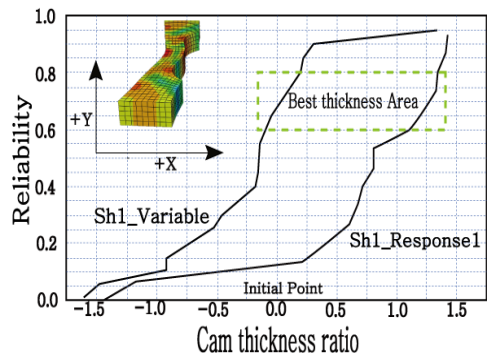


Fig. 16. Sh1 input sensitivity, Sh1 response sensitivity

Fig. 16에서 변수 Sh1은 입력 민감도가 되고 다른 한 쪽은 출력에 해당하는 Sh1에 대한 응답 민감도이다. 따라서 두 그래프가 차이를 보이는 것은 입력대로 값이 출

력되지 않는다는 것이다. 민감도 영역에서 볼 때 사각점 선인 Best thickness area와 같은 영역이 민감도에 적합한 영역이다.



Fig. 17. Variable sensitivity graph for the Sh1

Table 5. Variable Sh1, Sh2, input and output sensitivity of the Sh3

	Sh1	Sh2	Sh3	Response1	Response2	Response3
1	-0.1047589	-0.1019773	0.4221419	2.1171679	16.453999	59.156784
2	1.3842823	-0.3701200	0.2854562	0.6287487	5.3821659	17.182264
3	0.2919029	0.2206022	0.9279183	0.7867841	6.5020156	21.693062
4	0.7475559	0.0307860	0.4257560	0.8297873	6.8944907	22.955564
5	-1.8424669	-0.2432963	-0.2430838			
6	-0.5676509	-0.0711103	-0.6618516		[I]	
7	-0.2588818	0.5828137	0.2512223	1.8671057	14.409230	57.196835
8	1.5512474	-0.4129115	0.0227587	0.6655923	5.6991205	17.748463
9	-0.5252244	-0.9603276	0.5785620	6.3512187	50.609978	62.002602
10	-0.3594999	0.0431851	0.5515779	2.2737446	17.450006	59.989806
11	-0.6632454	0.2411724	0.6257026	2.6338837	19.854759	60.090466
12	-0.1311039	0.6827818	0.4753997	1.2725710	10.066241	36.750046
13	-0.4458811	-0.1043966	-0.6859599		[II]	
14	-0.1423843	-0.0537391	0.4762995	2.0262804	15.760352	59.04120
15	-0.1986668	0.0738241	-0.8808808			
16	0.2196060	-0.0872980	-0.3018073	3.0565839	23.525393	60.194592
17	-0.1306615	-0.5392913	-0.4774178	5.8173413	59.138027	59.600391
18	0.7591836	0.7737465	-0.7805792		[III]	
19	0.0487266	-0.4242110	0.5828757	1.8584290	14.740916	54.631989
20	0.5103694	0.3833823	0.2206859	1.0094593	8.2109718	26.769922

그 민감도를 변수별로 20개의 랜덤하게 볼 때 그림 Fig. 17은 민감도 변수 변화를 그래프로 나타내었고 그 결과를 Table 5로 수치적으로 나타내었다. Table 5 자료에서 Blank I, Blank II, Blank III, Blank IV은 과소 응답 결과인 관계로 수렴되지 않는 것을 수치로 표시할 수 없는 현상이다. 이것을 제외한 모든 부분은 모두 과소 이상의 값을 나타내고 있다. 따라서 Table 5의 결과 모습은 Fig. 18, Fig. 19에 나타내었다.

그리고 랜덤하게 입력 조건으로 선정된 값으로 30개의 Iteration으로 최적화 했을 때 응력과 캠의 두께의 변위를 불능, 과소, 과대, 최적으로 Fig. 18, Fig. 19에서 정리했다.

	A	B	C
Result Response Disabled			
Stress	Disabled	Disabled	Disabled
Depopulated Response Result			
Stress	118MPa	111MPa	115.6MPa

Fig. 18. Results not available and too few results.

Fig. 19에서 최적응답 결과 란에 양호한 3개를 추출할 수가 있었다. 그 중에서 최적응답 결과 “A”가 가장 좋은 응력 값이 68.4 Mpa로 적절한 두께로 최종형상으로 선정할 수 있었다.

	A	B	C
Excessive Response Result			
Stress	68.4MPa	69.74MPa	68.4MPa
Optimal Response Result			
Stress	68.4MPa	68.27MPa	68.8MPa

Fig. 19. Excessive results and proper results

Fig. 20에서 해석후 캠응력과 캠두께 변형률 관계 분류해서 정규분포로 표시했으며 그중에서 Design_space 범위 안에 드는 최적의 응답결과 정규분포 Fig. 20에서 (a)구역에서 형상은 정규분포도 범위 밖으로 벗어난 과소형상을 보여준다. Design_space 안에 들어 있는 (b)는 최적의 조건에 부합한 형상을 유지하고 있고, (c)는 과대형상으로 비정상적으로 형상부피가 과도하게 비정상적으로 커져있다. 따라서 스토캐스틱으로 30개를 출력된 결과 중에서 최적의 조건과 형상을 가진 것은 3개정도 나타났다. 샘플링 모집단의 결과로 정규분포 확률 표본들의 정규분포인 Design space 원의 영역에서 검출했을 때 불능 형상을 제외한 과소, 과대형상 그리고 최적형상으로 3가지로 나눌 수 있었다.

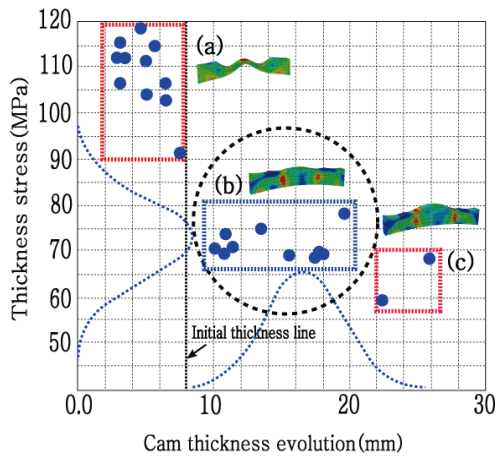


Fig. 20. Cam thickness and stress analysis and strain relations

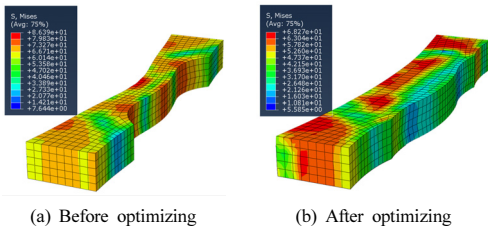


Fig. 21. Before and after shape optimizing

4. 결론

본 연구에서는 형상 최적화 해석을 구현하였다. 해석은 비선형 유한요소 해석을 통해 이루어졌고, 상용해석 프로그램인 Abaqus/Explicit 모드에서 Hyperstudy를 연동하여 사용하였다.

1. 일반적으로 각종구조물을 최적으로 설계하기 위해서는 수개의 목적 함수를 고려해야 하는데 이를 위해 Fig. 17과 같은 DOE 민감도에 의한 실험 계획법으로 1차로 걸러진 자료를 Fig. 20인 스토캐틱으로 최적자료의 결과를 정규분포 안으로 가져올 수 있었고 그 결과는 유용했었다.
2. 형상을 최적화 하면서 형상에 맞지 않은 변수의 입력 값과 응답 값의 민감도에 따라 부분적으로 최적해로의 수렴성이 좋지 않게 나왔지만 그러나 대부분의 문제에서는 Fig. 20과 같이 매우 좋은 수렴성을 보였다.

3. 다중목적함수 최적형상 두께는 결과적으로 초기 값 대비 17.5mm로 결정할 수가 있었다. 판재의 변형 없는 물성치를 얻을 수가 있었다.
4. Fig. 21에서 Cam 드라이브의 1차 해석 초기 응력 값은 (a)가 86.33 MPa 이었고, 2차 최적화 해석후 캠드라이브의 응력값은 (b)가 68.4 MPa으로 응력이 17.93 MPa으로 14.5% 감소되었다.
5. 판재 경화에 의한 캠 드라이브 변형이 형상 최적화로 캠 변형이 제거되고 판재가 정상적으로 플랜지 성형되면서 캠 드라이브의 최적 형상을 얻을 수 있었고 정밀 성형성에서 밀착도가 초기모델 보다 약 38% 향상되었다.
6. Fig. 21과 같이 최적화된 캠 드라이브의 형상의 변형 량은 해석 전 (a)의 형상부피가 $12,775mm^3$ 이고 해석 후 (b)의 형상부피가 $16,675mm^3$ 이다. 따라서 $3,900mm^3$ 인 16.7% 형상부피가 증가된 최적화 형상을 확보할 수가 있었다.

References

- [1] Junho, Jang. "Nonlinear Analysis and Optimum Design", Keimyung University press , pp.41-42, 2008
- [2] Lee, M., Kim, D., Kim, C., Wenner, M. L., Wagoner, R. H. and Chung, K., 2005, "Spring-Back Evaluation of Automotive Sheets Based on Isotropic-kinematic Hardening Laws and Non-Quadratic Anisotropic Yield Functions, Part II : Characterization of Material Properties," International Journal of Plasticity, Vol. 21, pp. 883-914.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.05.015>
- [3] Dassault System Simulia, "Abaqus/Explicit Advanced Topics Manual", pp. 321-332, 2013.
- [4] Dassault System Simulia, "Abaqus/Explicit Advanced Topics Manual", pp. 321-332, 2013.
- [5] Altair Engineering, inc. "HyperStudy Introduction Manual ver12", pp. 295-311,2014.
- [6] Altair Engineering, inc. "HyperStudy Introduction Manual", pp. 39-71, 2010.
- [7] Yoshida, F. and Uemori, T., 2003, "A Model of Large-Strain Cyclic Plasticity and Its Application to Springback Simulation," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 45, pp. 1687-1702.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2003.10.013>

[8] Altair Engineering, inc. "HyperStudy Introduction Manual", pp. 39-71, 2010.

[9] Yoshida, F, Uemori, T. and Fujiwara, K, 2002, "Elastic - lastic Behavior of Steel Sheets under Inplane Cyclic Tension - ompression at Large Strain," International Journal of Plasticity, Vol. 18, pp. 633~659.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00049-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00049-3)

[10] Dassault System Simulia, "Abaqus Manual Metal Inelasticity in Abaqus", pp. 37-63, 2015.

우 창 기(Chang-Ki Woo)

[정회원]



- 1989년 2월 : 단국대학교 기계공학 (공학박사)
- 1980년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 공학대학 기계시스템공학부 교수

이 종 배(Jong-Bae Lee)

[정회원]



- 2009년 2월 : 서울과학기술대학교 정밀기계공학과 (기계공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 대학원 기계공학 (박사과정)
- 1990년 3월 ~ 현재 : 한국GM 생산기술연구소 (선임연구원)

<관심분야>

구조및 열, 유체해석, 최적화해석, 전단파괴해석

<연구분야>

파괴역학, 금형설계, 비파괴해석(Using Acoustic Emission)

김 선 삼(Seon-Sam Kim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 인천대학교 기계공학 (기계공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 유한대학교 금형설계과 (겸임교수)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 대학원 기계공학 (박사과정)

<관심분야>

사출금형, 성형 기술, 핫 런너, 프레스 금형.