

근사 최적화 기법을 이용한 펀치 단조품의 예비성형체 설계

박상근*

¹한국교통대학교 기계공학과

Preform Design of a Forged Punch by Approximate Optimization

Sangkun Park^{1*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

요약 본 연구는 본 연구에서 제안하는 근사 최적화 방법(메타모델 기반의 시뮬레이션 최적화)을 사용하여 저렴한 해석 비용으로 펀치 단조품의 예비성형체(preform)를 설계한다. 본 연구에서 사용한 설계목표는 유효변형률의 균일한 분포이고 설계변수는 예비성형체 치수이며, 구속조건으로 최대 미충진 비율을 사용한다. 이를 위해 먼저 예비성형펀치(반재), 마스터펀치(상부다이) 및 하부다리로 구성되는 단조성형 공정을 DEFORM 시뮬레이션에 의해 모사하고, 이 시뮬레이션 결과가 실제 단조 공정을 모사하고 있는지 확인하는 검증 방법에 대해 소개한다. 또한 본 연구에서 수행한 설계 최적화 과정, 즉 (i) 초기 메타모델의 생성, (ii) 메타모델의 최적화 수행, (iii) 메타모델 최적해의 검증, (iv) 메타모델의 개선에 관하여 상세히 기술한다.

Abstract In this paper, attempts were made to design a preform for a final punch inexpensively using the proposed approximate optimization method or metamodel-based simulation optimization. The design objective of this work is to achieve a uniform distribution of effective strains, the angle dimension of the preformed punch is chosen as a design variable, and maximum underfill ratio is used as a constraint. For this optimization, a computer simulation of a practical punch forging process is run using DEFORM software, in which a preformed punch(workpiece), a master punch(upper die), and a bottom die are dealt with. A validation method is introduced to determine if the simulation results match the actual forging process. In addition, this work presents the detailed design optimization procedure consisting of (i) generation of an initial metamodel, (ii) metamodel optimization, (iii) validation of metamodel-predicted optimum, and (iv) metamodel improvement.

Key Words : approximate optimization, forging process, preform design, metamodel-based optimization

1. 서론

최근에 산업이 급격히 발달하고 기술수준의 전반적인 향상과 더불어 CAD/CAM 및 CAE 기술을 활용하여 단조품의 전산 해석 및 공정설계 자동화 개발에 관심이 높아지고 있다. 단조에 관한 설계 지식[1,2]들은 대부분 오랜 경험에 바탕을 둔 정성적인 지침들로 이루어져 있으며, 이것을 정량화하고 체계화하여 기존 공정의 분석 및 개선, 나아가 새로운 단조 기술의 개발이 기술 경쟁력의 핵심으로 주목받고 있다.

한편, 현장에서 실제적으로 성형 해석을 통한 공정 및 제품 설계를 수행하기 위해서는 단순히 해석 시뮬레이션 기술뿐만 아니라 효율적인 최적화 방법에 관한 연구가 절실히 필요하다[3]. 특히 단조성형 시뮬레이션의 경우에 한 번 시뮬레이션 하는데 소요되는 해석 비용(시간)이 상당히 크기 때문에, 다수의 시뮬레이션 횟수를 요구하는 일반적인 최적화 방법은 현실적이지 못하며, 따라서 해석 시뮬레이션 횟수를 가능한 최소화할 수 있는 설계 최적화 방법에 관한 기술 확보가 더욱 중요하다. 결국, 펀치 단조품의 경우 단조 시뮬레이션 자체의

*Corresponding Author : Sangkun Park(Korea National Univ. of Transportation)

Tel: +82-43-841-5122 email: skpark@ut.ac.kr

Received March 6, 2014

Revised (1st May 9, 2014, 2nd June 3, 2014)

Accepted July 10, 2014

그리고 재료의 물성 자료로서 반재 및 펀치는 각각 완전 소성체, 마스터 및 다이는 각각 강체(rigid material) 모델을 사용하였고, 단조 공정 자료로서 마스터의 이동 거리 및 접촉이 발생하는 부위에서의 마찰 계수 등을 입력하였다.

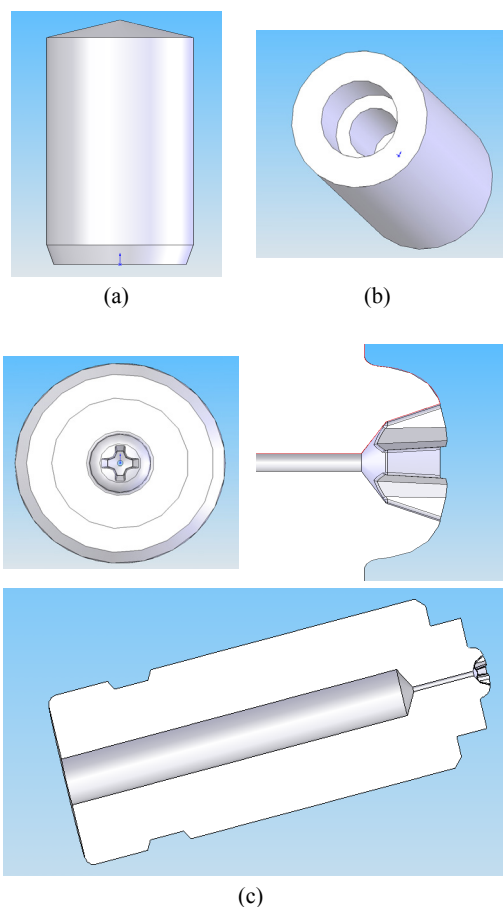
이렇게 입력된 자료 중 입력 자료의 오류를 사전에 검증하기 위해 Fig. 4와 같이 구성 부품 간의 조립 간섭 등을 확인하였고, 반재와 제품 간의 질량 비교를 통하여 성형 전과 후의 모델 크기에 관한 비교 검증을 수행하였다. 그리고 시뮬레이션 해석 조건이 올바르게 설정되었는지 짧은 시간 내에 확인하기 위해 초벌 해석을 수행하였다.

한편, 적은 계산 비용으로 해의 정확성 및 수렴성을 확보하기 위해, 대상 모델의 형상 복잡성 및 해석 해의 복잡성을 고려하여 메쉬 해상도를 설정하였고, 대상 모델의 형상과 해석 공간이 모두 동일하게 8등분 가능하므로, 해석 시간의 단축 및 정밀도 향상을 위해 Fig. 5와 같이 1/8형상으로 시뮬레이션을 수행하였다.

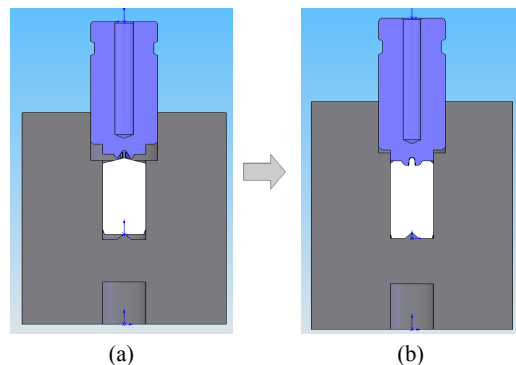
2.2 실제 공정의 모사 및 검증

위의 절에서 설명한 바와 같이 설정된 시뮬레이션 작업 환경 하에 입력된 반재 형체는 최종 목표 형상인 펀치 형상으로 변형하게 되는데, 최종 변형된 펀치 형상이 목표 형상과 차이가 없는지 확인한다. 즉 기하학적 형상 측면에서 목표 형상과의 형상 차이를 확인하며, 미충진 및 과충진 발생 여부 등도 함께 확인한다. 만약 차이가 있다면 그 원인을 찾아 재료조건, 형상조건, 메쉬조건, 마찰조건, 및 stroke 조건 등을 재입력하고 다시 시뮬레이션을 수행한다. 참고로 DEFORM에서는 표면 장력이라는 현상을 고려하지 않기 때문에 작은 구멍에도 소재가 큰 저항 없이 들어간다. 이 때문에 해석 시뮬레이션 시에 마스터의 air-vent 구멍으로 소재가 빠져 나가는 현상이 발생한다. 실제 공정에서 표면 장력에 의해 발생하지 않는 소재 유출 현상을 막기 위해, 해석 시 마스터의 air-vent 구멍을 막았다.

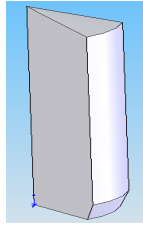
이러한 DEFORM 시뮬레이션은 차이가 없을 때까지 진행되는데, 이것은 실제 공정에서 제조된 펀치와 계산 시뮬레이션을 통하여 성형된 펀치와의 비교 검증을 통해 시뮬레이션의 해석 신뢰성을 보장받기 위함이다.



[Fig. 3] 3D CAD models created by SolidWorks S/W (a) preformed punch (b) bottom die (c) master punch



[Fig. 4] System layout for punch forging process (a) before forging process (b) after forging process



[Fig. 5] 1/8 punch model used for DEFORM simulation

3. 최적화 설계기법

3.1 최적화 문제의 정의

본 연구에서 정의한 설계 목표 및 목표 달성에 필요한 설계변수, 구속조건, 공정조건, 그리고 적용된 접근방식(최적화 기법)은 아래와 같다.

□ 설계목표	재료의 균일한 변형
□ 설계변수	반재각도
□ 구속조건	- 미충진 비율 < 1.0% - 67° ≤ 반재각도 ≤ 80.2°
□ 공정조건	- 마찰계수 = 0.10 - Die 이동 속도 = 7.36mm/sec
□ 접근방식	- 메타모델로서 다항식(polynomial function) 모델[9] 사용 - 시뮬레이션 횟수의 증가를 통한 메타모델의 정확도(fidelity) 개선[10] - 가중치 분산 (weighted variance) 도입

3.2 목적함수

설계목표인 재료의 균일한 변형을 최대화하기 위해 정의한 목적함수는 식 (1)과 같다.

$$f = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \left(\varepsilon_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (1)$$

여기서 ε_i 는 i -번째 요소의 유효 변형률(effective strain)이고, N 은 요소의 개수이며, w_i 는 i -번째 요소의

체적(volume)이다. 본 연구에서 정의한 목적함수는 메쉬를 구성하는 사면체 요소 각각에 대하여 유효 변형률(effective strain)을 계산하고 이들의 가중치 분산(variance)을 의미한다. 여기서 가중치 분산은 각 요소의 체적을 가중치로서 분산 계산에 포함시킴으로써 재료 변형의 실제 크기를 정량화하기 위함이다. 참고로 사면체 요소의 체적은 사면체의 한 꼭지점에서 다른 세 개의 꼭지점까지의 벡터를 각각 e_1, e_2, e_3 라 할 때 다음의 식 (2)와 같이 계산된다.

$$w_i = \frac{1}{6} |e_1 \times e_2| \left| \frac{e_1 \times e_2}{|e_1 \times e_2|} \cdot e_3 \right| \quad (2)$$

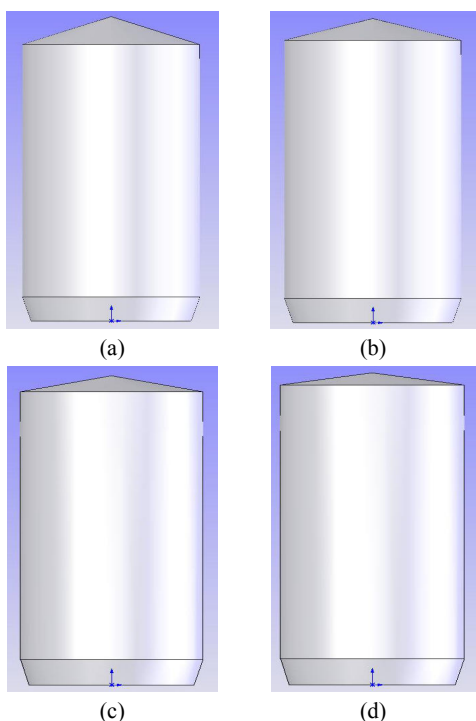
3.3 구속조건

본 연구의 설계 구속(제한)조건으로 미충진(underfill) 비율을 설정하였다. 미충진 비율은 식 (3)과 같이 정의되며 그 값은 0.1보다 작아야 한다.

$$g = \frac{V_{desire} - V_{actual}}{V_{desire}} < 0.1 \quad (3)$$

여기서 V_{desire} 는 최종 목표형상인 펀치의 부피이고, V_{actual} 은 DEFORM 시뮬레이션을 통해 실제 계산된 펀치의 부피를 말한다. 즉 미충진이란 이들 두 부피 간의 차이를 말하는데 이 값을 목표 형상인 펀치 부피로 나눔으로써 기준 부피에 관한 미충진 비율을 계산한다. 본 연구에서 설정한 최대 미충진 비율은 1.0%로서, 이 값은 수치적 계산 시에 흔히 발생하는 절단 오차(truncation error)를 고려한 값이다. 결국, 미충진 비율이 1.0%이상이면 미충진이 발생하였다고 판단하며 그 절대값이 1.0%이하이면 미충진은 없다고 판정한다.

그리고 설계 변수로서 설정한 반재 각도의 정의는 Fig. 6과 같이, 그 유효한 설계 범위로 67° ~ 80.2°를 설정하였다. 참고로, 반재 각도 72°는 (주)TNP에서 현재 양산하고 있는 제품의 반재 각도이며 80.2°는 과거에 사용하였던 각도이다. 이밖에 본 연구 DEFORM 시뮬레이션에서 설정한 공정조건은 다음과 같다. 즉 마스터와 반재 간의 마찰계수로서 흔히 사용되는 0.1의 값을 설정하였고, 마스트 다이(die)의 이동속도로서 7.36mm/sec 값을 설정하였다.



[Fig. 6] Preformed punch models

- (a) $\theta = 67^\circ$ (b) $\theta = 72^\circ$
- (c) $\theta = 77^\circ$ (d) $\theta = 80.2^\circ$

3.4 근사 최적화 수행 및 결과

연구에서 사용한 최적화 기법은 근사 최적화 방법으로서 상당한 계산 시간을 요구하는 목적함수의 최적 해를 비교적 짧은 시간 내에 근사적으로 구하기 위하여 고안된 최적화 방법이다. 즉 최적화 과정에서 수반되는 목적함수의 계산 및 최적해 탐색 과정을 장시간이 소요되는 CAE 해석 시뮬레이션을 통하여 직접 구하지 않고, 간접적으로 근사적 해석 모델을 생성하고 이 근사 모델에 관한 최적화 계산을 저렴한 계산 비용으로 수행함으로써, 원래 문제의 최적 해를 근사적으로 도출해 내는 방법이다. 본 연구에서 추진한 이러한 근사 최적화 방법의 수행 절차 및 그 결과를 상세히 살펴보면 다음과 같다.

□ 단계 1 : 초기 메타모델의 생성

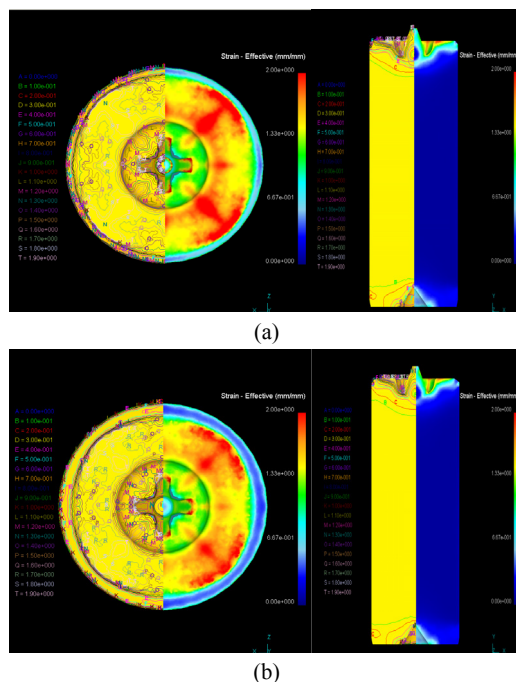
- 반재 각도(설계변수)가 $67^\circ, 72^\circ, 77^\circ, 80.2^\circ$ 인 샘플 모델을 생성한다. (Fig. 6 참조)
- 각 샘플 모델에 대해 DEFORM 시뮬레이션을 수

행한다. (주요 입력 자료는 Table 1 참조, 해석 결과는 Fig. 7.(a) ~ (d) 참조)

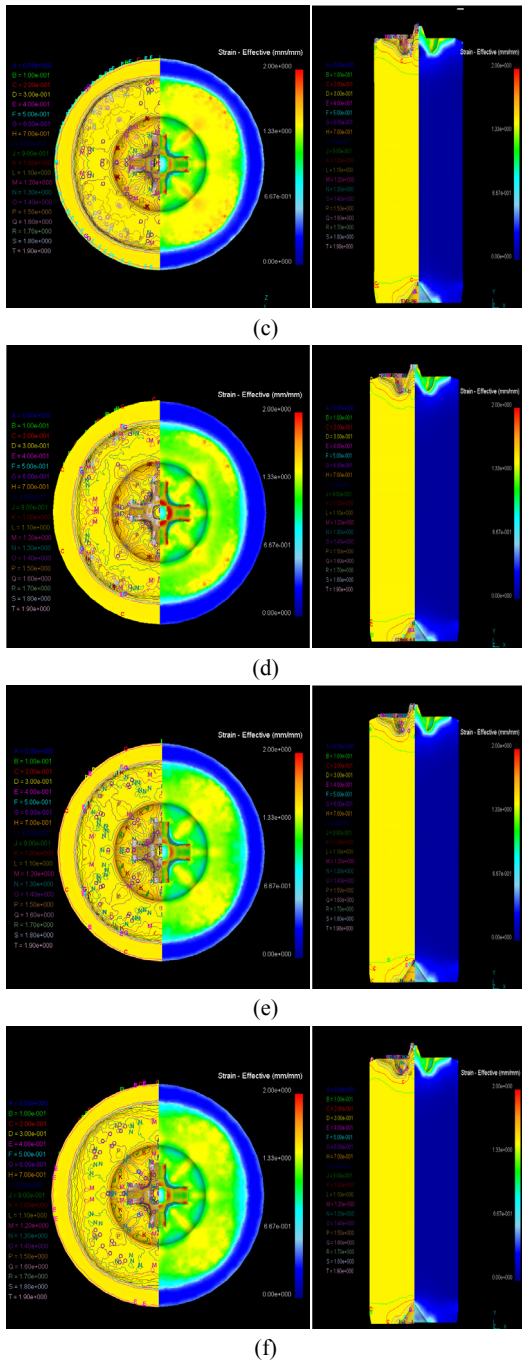
- 각 시뮬레이션 결과로부터 가중치 변형률 분산(목적함수)을 계산한다. (Table 2 및 3 참조)
- 4개의 샘플 점 (x, y) (여기서 $x =$ 반재 각도, $y =$ 가중치 변형률 분산 값)를 가지고 3차 다항식 곡선을 사용하여 메타모델을 생성한다. (Fig. 8.(a) 참조) 본 연구의 경우 최적화 문제의 특성을 고려하여 메타모델로서 3차 다항식 곡선을 사용하였으나, 방사 기저함수 등의 메타모델을 사용할 수 있다.

□ 단계 2 : 메타모델의 최적화 수행

- 기존의 최적화 기법을 사용하여 3차 다항식 곡선의 최소점 위치를 탐색한다. 이 최소점이 바로 근사 최적해이다. (Fig. 8.(a) 참조)
- 근사 최적 해에 대응하는 목적함수(즉 가중치 변형률 분산) 값을 메타모델로부터 계산한다. (Table 4 참조)



[Fig. 7] Distribution of effective strains
(a) $\theta = 67^\circ$ (b) $\theta = 72^\circ$



[Fig. 7] (Continued)

(c) $\theta = 77^\circ$ (d) $\theta = 80.2^\circ$
 (e) $\theta = 78.51^\circ$ (f) $\theta = 78.72^\circ$

□ 단계 3 : 메타모델 최적해의 검증

- 단계 2에서 구한 근사 최적 해를 가지고 샘플 모델

을 생성한다.

- 샘플 모델을 대해 DEFORM 시뮬레이션을 수행한다. (Fig. 7.(e) 참조)
- 시뮬레이션 결과로부터 가중치 변형을 분산을 계산한다. (Table 3의 $\theta = 78.51^\circ$ 참조)
- 단계 2에서 근사 모델을 통해 얻은 근사 값(Table 4 참조)과 현 단계 시뮬레이션을 통해 얻은 실제 값(Table 3의 $\theta = 78.51^\circ$ 참조)을 비교하여 최적해 여부를 판단한다. (Fig. 8.(b) 참조) 또한 근사 최적해 근방의 목적함수 분석을 통하여 최적여부를 확인할 수도 있다. (Table 3의 $\theta = 78.72^\circ$ 및 Fig. 7.(f), Fig. 8.(c) 참조)
- 최적해라고 판단되면 본 최적화 과정을 종료하고, 아니면 단계 4로 이동한다.

□ 단계 4 : 메타모델의 개선

- 단계 3에서 획득한 근사 최적해 위치에서의 샘플 점을 추가하여 개선된 메타모델을 생성한다. (Fig. 8.(b) 참조) 여기서 개선된 메타 모델이란 샘플 점의 추가를 통하여 이전보다 근사오차가 작음, 즉 정확도(fidelity)가 높은 모델로 접근한 모델을 말한다.
- 단계 2로 이동한다.

[Table 1] Preprocessing data for DEFORM simulations

	movement of upper die	friction coeff.	movement velocity	material	no of elements
67°	4.94mm	0.10	7.36 mm/sec	SKH51	100,000
72°	4.62mm				
77°	4.25mm				
80.2°	4.09mm				
78.51°	4.20mm				
78.72°	4.19mm				

[Table 2] Simulation results of 1/8 punch model θ

θ	f	volume	$g < 1\%$
67°	0.110202	361.83	-1.73%
72°	0.102158	359.01	-0.93%
77°	0.079236	356.47	-0.22%
80.2°	0.088036	354.90	0.22%
78.51°	0.074387	355.71	-0.01%
78.72°	0.076851	355.62	0.02%

[Table 3] Main parameters of preformed and target punch

target punch			preformed punch			friction coefficient	
	height	volume	height	volume			
min	25.00	2816.84	min	25.2	11.98	min	0.08
mid	25.25	2845.49				mid	0.10
max	25.50	2874.27	max	25.4		max	0.12

[Table 4] Optimal solution predicted by the proposed optimization technique

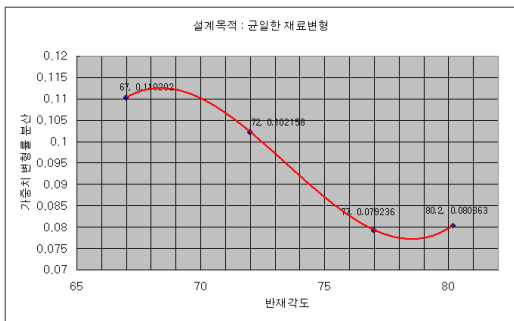
θ	f
78.51°	0.0771

4. 결론

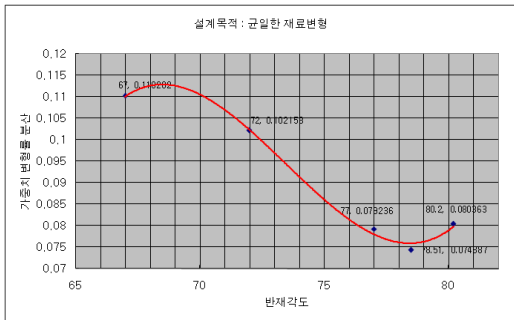
본 연구에서는 반재, 펀치, 마스터, 다이로 구성되는 단조성형 공정을 DEFORM 시뮬레이션에 의해 모사하였고, 나아가 본 연구에서 제안하는 근사 최적화 기법에 의해 최종 펀치가 최대한 균일한 변형에 의해 성형될 수 있게 하는 최적의 반재 각도 78.51°를 도출하였다. 여기서 최종 펀치는 주어진 미충진 조건을 만족하며 주어진 설계범위 안에 존재한다.

본 연구에서 제안하는 방법은 메타모델 기반의 최적화 방식으로 구배 등의 미분정보 없이도 메타모델의 저비용 계산을 통해 근사 최적 해를 구하며, 이때 DEFORM 시뮬레이션 회수의 점진적 증가를 통해 메타모델의 정밀도를 증가시키기 때문에 근사 최적 해의 근사오차를 줄여나갈 수 있다. 즉 메타모델 최적화 방식에 기반을 두며 해석 시뮬레이션 횟수가 증가함에 따라 메타모델의 충실도를 높여가는 방법이다. 이러한 본 연구 방식은 단조 성형과 같이 고비용(장시간)의 시뮬레이션이 요구되는 분야(예: CAE 및 CFD분야)의 최적설계 시 저비용으로 근사 최적해를 제공해 줄 수 있는 기본 프레임으로 활용될 수 있으리라 기대된다.

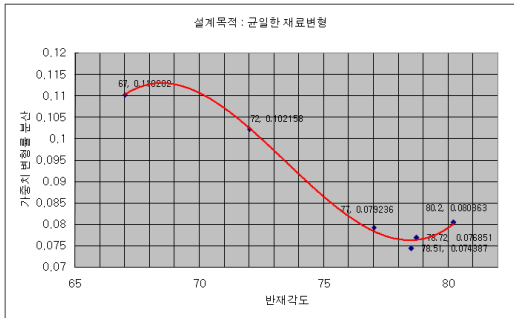
향후 연구 내용으로 본 연구에서 제시한 기본 프레임을 기반으로 새로운 메타모델로서 RBF(radial basis function)[11]모델에 관한 분석이 필요하고, 초기 메타모델의 충실도 향상을 위한 Latin hypercube 샘플링[12] 등의 실험계획법에 관한 연구가 필요하다. 더불어 메타모델 기반의 전역 최적화에 관한 추가 연구가 수행되어야 한다.



(a) Starting model



(b) Improved model



(c) Checking if convergence

[Fig. 8] Metamodel imitating expensive simulation behaviors for approximate solution.

References

[1] C. S. Han, R. V. Grandhi, and R. Srinivasan, "Optimum design of forging die shapes using nonlinear finite element analysis", *AIAA Journal*, Vol. 31, pp.774 - 784, 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/3.49021>

[2] B. S. Kang, N. Kim, and S. Kobayashi, "Computer-aided preform design in forging of an airfoil section blade", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 30, pp.43 - 52, 1990.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955\(90\)90040-P](http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955(90)90040-P)

[3] D. Y. Li, Y. H. Peng, and J.L. Yin, "Optimization of

metal-forming process via a hybrid intelligent optimization technique", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 34, pp.229-241, 2007.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-006-0075-1>

- [4] T. Simpson, J. Peplinski, P. Koch, J. Allen, "Metamodels for computerbased engineering design: Survey and recommendations", *Engineering with Computers*, Vol. 17, pp.129-150, 2001.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/PL00007198>

- [5] J. P. C. Kleijnen, "Response surface methodology for constrained simulation optimization: an overview", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 16, pp.50-64, 2008.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2007.10.001>

- [6] J. R. Koehler and A. B. Owen, "Computer Experiments", *Design and Analysis of Experiments*, edited by S. Ghosh and C. R. Rao, Vol. 13 of Handbook of Statistics, North-Holland, New York, pp. 261 - 308, 1996.

- [7] N. M. Alexandrov, "Approximation and model management in aerodynamic optimization with variable-fidelity models", *Journal of Aircraft*, Vol. 38, No. 6, 2001.

DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/2.2877>

- [8] A. Booker, J. Dennis, P. Frank, D. Serafini, V. Torczon, and M.A Trosset, "Rigorous framework for optimization of expensive functions by surrogates", *Structural Optimization*, Vol. 17, pp.1 - 13, 1999.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01197708>

- [9] C. deBoor, and A. Ron, "Computational aspects of polynomial interpolation in several variable", *Mathematics of Computation*, Vol. 58, pp.705 - 727, 1992.

DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/2153210>

- [10] A. I. J. Forrester and A. J. Keane, "Recent advances in surrogate-based optimization", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 45, pp.50 - 79, 2009.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2008.11.001>

- [11] H. Fang, and M. F. Horstemeyer, "Global response approximation with radial basis functions", *Journal of Engineering Optimization*, Vol. 38, No. 4, pp.407-424, 2006.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/03052150500422294>

- [12] K. Ye, "Orthogonal column latin hypercubes and their application in computer experiments", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 93, pp.1430 - 1439, 1998.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1998.10473803>

박 상 근(Sangkun Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 공과대학 원 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 공과대학 원 기계설계학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 1999년 4월 : 삼성 SDS 책임연구원
- 2000년 4월 ~ 2001년 2월 : 서울대 BK21 기계분야 계약교수
- 2003년 8월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

CAD/CAM/CAE, 설계최적화, 전산기하학