

A* 탐색 알고리즘을 이용한 냉간 단조 공정 설계

김 홍 석, 임 용 택

한국과학기술원 기계공학과

Multi-Stage Cold Forging Process Design with A* Searching Algorithm

Hong-Seok Kim and Yong-Taek Im

Korea Advanced Institute of Science and Technology
Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

Conventionally design for multi-stage cold forging depends on the designer's experience and decision-making. Due to such non-deterministic nature of the process sequence design, a flexible inference engine is needed for process design expert system. In this study, A* searching algorithm was introduced to arrive at the better process sequence design considering the number of forming stages and levels of effective strain, effective stress, and forming load during the process. In order to optimize the process sequence in producing the final part, cost function was defined and minimized using the proposed A* searching algorithm. For verification of the designed forming sequences, forming experiments and finite element analyses were carried out in the present investigation. The developed expert system using A* searching algorithm can produce a flexible design system based on changes in the number of forming stages and weights.

Key Words: Multi-Stage Cold Forging Process Design, A* Search, Flexibility, Verification, Finite Element Method, Forging Experiment

1. 서 론

냉간 단조는 몇단계의 중간 단계를 통하여 제품을 성형하는 공정으로서, 제품의 성형 가능성이나 품질, 생산비 등은 중간 성형 공정 설계에 크게 의존하게 된다. 현재 냉간 단조 공정의 설계는 숙련된 설계자의 경험과 판단에 의존하여 수행되고 있는데, 설계자에 따라 동일한 제품에 대해서도 상이한 공정이 설계될 수 있다[1-3]. 최근에 전문가 시스템 기법을 이용하여 냉간 단조 공정 설계를 수행함으로써 설계 단계에서의 시행착오를 줄이고자 하는 노력이 활발하게 이루어지고 있다[4-9]. 그러나 기본적인 설계 규칙의 데이터베이스화와 간단한 추론 만으로는 생산 조건을 고려한 다양한 공정의 설계를 수행할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 공정 설계에 다양성을 부여하기 위하여 추론 엔진에 A* 탐색 알고리즘을 도입하였다. A* 탐색 알고리즘이란 인공지능 탐색 기법 중의

하나로서 탐색 방향을 결정하기 위해 비용 함수를 설정하고 비용 함수가 최소가 되는 방향으로 탐색을 진행해 나가는 방법이다.

본 연구에서는 개발된 시스템의 설계 능력을 검증하기 위하여 설계된 공정에 대한 성형 실험과 유한요소해석을 수행하였다. 성형 실험을 통하여 설계 공정의 결합 유무를 검토하여 보았으며, 각 성형 단계의 성형 하중을 측정하였다. 또한 유한요소해석 결과를 실험 결과와 비교하여 보았으며, 이를 통하여 개발된 전문가 시스템의 성능을 평가하여 보았다. 성형 실험과 유한요소해석을 통한 시스템의 검증을 바탕으로, 본 연구에서 도입된 A* 탐색 알고리즘의 가중치와 제한성형수를 다양하게 변화시켜 재설계를 수행함으로써 개발된 시스템의 유연성을 확인하여 보았다.

2. A* 탐색 알고리즘을 이용한 냉간 단조 공정 설계

Fig. 1과 같이 동일한 소재를 사용한 동일한 형상의 제품이라도 설계자의 경험과 생산 설비의 성능, 제품의 품질 기준에 따라서 설계자마다 서로 다른 생산 공정이 설계될 수 있다. 따라서 우수한 설계 공정을 얻기 위해서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 가능한 모든 설계에 대한 고려가 이루어져야 하는데, 그림에서와 같은 가지(tree) 형태를 갖는 탐색 문제는 인공지능 탐색 기법 중의 하나인 A* 탐색 알고리즘[10-12]을 통하여 효과적으로 수행될 수 있다.

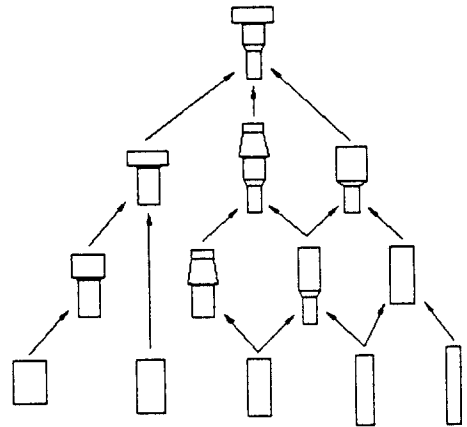


Fig. 1 An example of cold forging process sequences.

2.1 A* 탐색(A* Search)

Fig. 2에 탐색 가지의 예를 나타내었다. 그림에서 Start는 탐색의 출발점을 나타내며, A, B 등은 탐색 절점 들을 나타내고, f 는 비용함수의 값이다. 비용함수는 해의 적합성을 나타내는 함수로서 예를 들면, 가장 빠른 시간에 여행 목적지까지 도달할 수 있는 경우유저를 찾는 문제의 경우에 비용함수는 출발 지점에서 탐색 절점까지의 도달 시간과 탐색 절점에서 목적지까지의 도달 시간의 합이 될 수 있다. A* 탐색은 출발점에서 비용함수의 값이 최대 또는 최소가 되는 방향으로 해까지 탐색을 수행하는 방법으로서 그림에서 탐색 경로는 Start(0.0) --> C(0.5) --> B(1.0) --> H(1.5) --> D(2.0) --> I(2.5) --> K(2.5) --> G(3.0) --> R(3.5)이 되며, 해는 R이 된다. 여기서 괄호 안의 숫자는 경로에 따라 누적된 비용함수의 값이다.

2.2. 냉간 단조 공정 설계에서의 A* 탐색 알고리즘의 적용

초기 소재의 지름에 따라 중간 성형 공정의 종류와 순서가 결정되기 때문에 초기 소재 지름의 결정은 냉간 단조 공정 설계 시 가장 먼저 수행되는 작업이다. 따라서 탐색 절점의 1차 생성층(Fig. 2에서 B, C, D)은 지름이 다른 원통 형상의 초기 소재가 되며, 따라서 1차 탐색 절점층은 최대 초기 소재 지름과 최소 초기 지름 사이에서 선택된 가능 초기 소재 들이 된다. 2차 탐색 절점층부터는 결정된 성형 순서의 변화만을 통하여 생성된다. 본 연구에서 사용된 평가 함수는 (1)식과 같다.

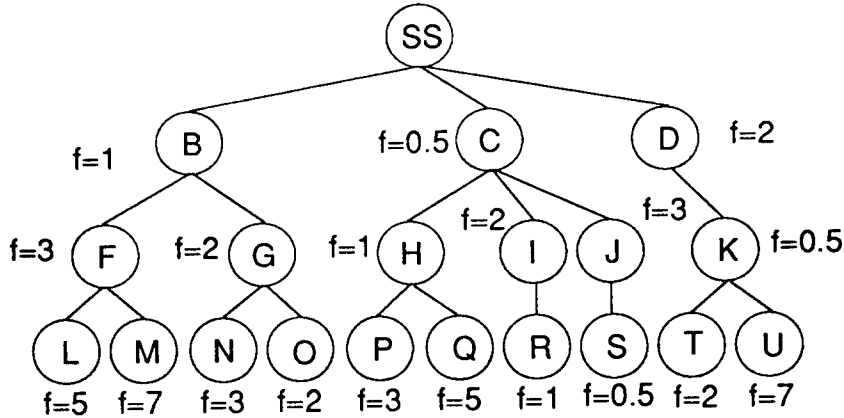


Fig. 2 An example of searching tree.

$$f(n) = -w_1 f_1(n) + \sum_{i=2}^5 w_i f_i(n). \quad (1)$$

(1)식에서 $f_1(n)$ 은 n 번째 탐색 절점에서 설계된 공정수가 증가할 때마다 1씩 증가하는 함수이며 $f_2(n)$ 과 $f_3(n)$ 은 탐색 절점 n 에서 성형되는 제품의 유효 응력 편차와 유효 변형률 편차로서 $f_2(n)$ 과 $f_3(n)$ 이 작을수록 제품의 경도 편차가 작게 된다. $f_4(n)$ 과 $f_5(n)$ 은 절점 n 에서 설계된 각 공정들의 성형 하중 편차와 최대 성형 하중으로서 성형 하중의 국부적인 상승으로 인한 성형의 불건전성을 고려하여 도입된 비용 함수이다. 각 비용 함수는 가중치 w_i 와의 곱으로 표현되므로 가중치의 조정을 통하여 고려된 성형 변수의 영향을 크게 또는 작게 할 수 있다.

3. 실험과 유한요소해석을 통한 설계 공정의 검토

본 연구에서는 전문가 시스템에서 설계된 공정의 신뢰성을 검증하기 위하여 기본적인 추론[9]을 사용하여 설계된 공정에 대하여 성형 실험과 유한요소해석을 수행하였다. 전문가 시스템에서 설계된 공정은 Fig. 3에 나타낸 도면과 같고 계산된 성형하중과 평균유효변형률은 Fig. 4와 같다. 최종 단조품은 핀형상의 제품으로서 Fig. 3의 도면에 근거하여 금형의 설계를 수행하였으며 실험에 사용된 소재는 본데라이트 처리된 AISI 1045이다. 성형 실험에는 450톤 유압식 프레스와 50톤 만능 시험기가 사용되었고, Load Cell과 LVDT를 사용하여 성형하중을 측정하였다. 계산된 공정 변수의 검증을 위하여 2차원 강점소성 유한요소법을 사용하여 전문가 시스템에서 설계된 3단계 공정을 해석하였다. 축대칭 형상이므로 전체의 1/2만을 해석하였고 마찰계수는 0.04로 하였다.

실험을 통해 성형된 중간 단조품을 Fig. 5에 나타내었는데 업세팅 시의 연성 파괴나 좌굴, 전방압출 시의 표면 결함없이 완전한 제품을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 유한요소해석을 통하여 얻어진 유효변형률 분포를 Fig. 6에 나타내었는데 Fig. 4의 요소균일 유효변형률을 비교하여 볼 때 변형이 심한 모서리부의 경우 차이가 심하지만 단순한 식으로 평균적인 유효변형률은 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 유한요소해석과

성형 실험을 통하여 얻어진 성형하중-변위선도를 Fig. 7에 나타내었는데 유한요소해석 결과와 실험 결과가 근사함을 알 수 있었고, Fig. 4에 나타낸 근사해석 결과와 10% 오차 범위 내에서 일치함을 알 수 있었다.

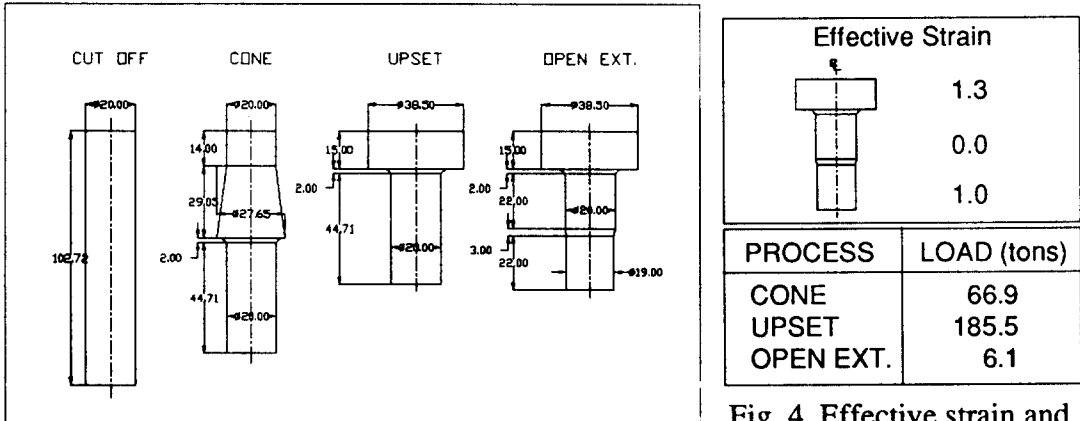


Fig. 3 Drawing of the designed process sequence.

Fig. 4 Effective strain and forming load for Fig. 3.

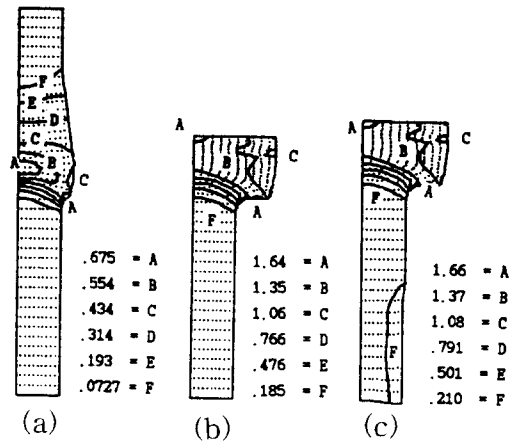
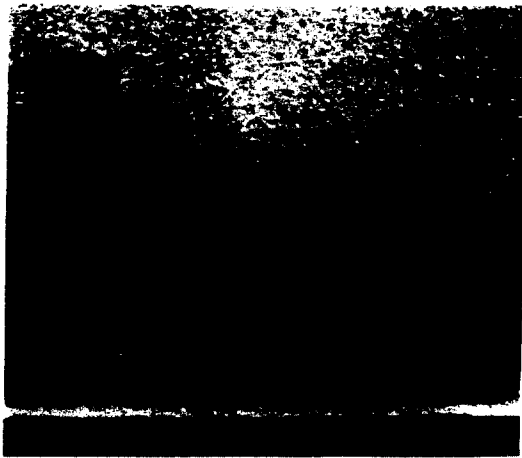


Fig. 5 Deformed shape of Fig. 3 obtained by forming experiments.

Fig. 6 Effective strain of Fig. 3

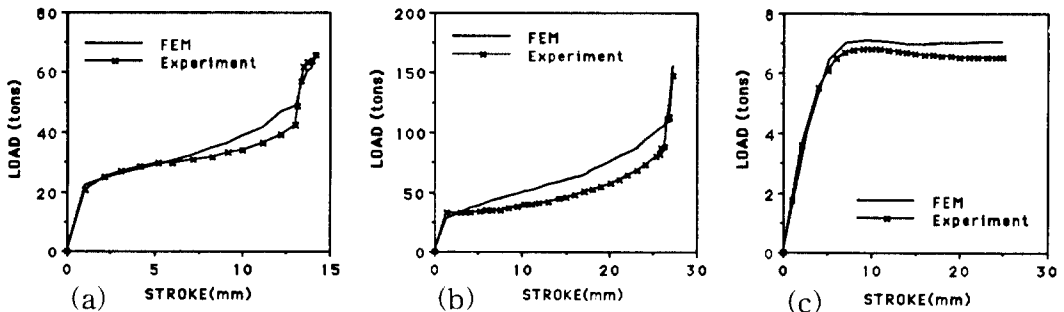


Fig. 7 Comparison of forming loads between FEM and experiments: (a) preform upsetting, (b) final upsetting, and (c) forward extrusion.

4. A* 탐색 알고리즘을 통한 재설계

본 연구에서는 전문가 시스템에서 설계된 공정에 대한 성형 실험과 유한요소해석을 수행하여 개발된 시스템의 타당성을 확인할 수 있었고, 이러한 검증을 바탕으로 개발된 시스템의 유연성을 검토하기 위하여 A* 탐색 가중치를 다양하게 변화시켜 재설계를 수행하여 보았다.

탐색 가중치를 모두 10으로 하였을 때의 3단계 공정은 Fig. 3에서의 기본 설계와 동일하였고, 가중치를 $w_1=-100$, $w_2=10$, $w_3=10000$, $w_4=10$, $w_5=10$ 으로 하였을 때 설계된 공정은 Fig. 8(a)와 같았다. 음의 값을 갖는 w_1 의 영향으로 폭방향탐색 경향을 유발시켰으며 w_3 만을 크게 증가시켜 유효응력의 편차를 줄이고자 하였다. 이 경우 초기 소재 직경은 23.1mm가 되어 2차례의 전방 압출이 요구되었으며 업세팅비가 감소하여 예비 업세팅을 수행할 필요가 없었다. $w_1=10$, $w_2=10$, $w_3=10$, $w_4=10000$, $w_5=10000$ 으로 성형 하중에 대한 가중치가 증가하였을 경우의 3단계 재설계 공정을 Fig. 8(b)에 나타내었다. 이 경우 초기 소재 직경은 19.5mm로 1공정에서 하단부의 19.0mm를 성형하기 위하여 비구속 전방압출을 수행하였고 상단부에 예비 업세팅을 수행하였다. 그리고 2공정과 3공정 2회에 걸쳐 상단부의 성형을 수행하였다.

Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에 나타난 설계 공정에 대하여 유한요소해석을 수행하여 얻어진 유효변형률 분포를 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 각각 나타내었다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)를 비교하여 보면 Fig. 9(a)의 공정이 Fig. 9(b)에 비하여 보다 균일한 유효변형률 분포를 갖음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 9(a)의 유효변형률 분포는 Fig. 6에 나타난 기본 설계 공정의 유효변형률 분포보다도 균일함을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 8(a)와 같이 탐색 가중치를 $w_1=-100$, $w_2=10$, $w_3=10000$, $w_4=10$, $w_5=10$ 로 하여 설계된 공정은 Fig. 3이나 Fig. 8(b)에 나타난 공정에 비하여 보다 우수한 기계적 특성을 갖게 될 것이라고 예측할 수 있었다.

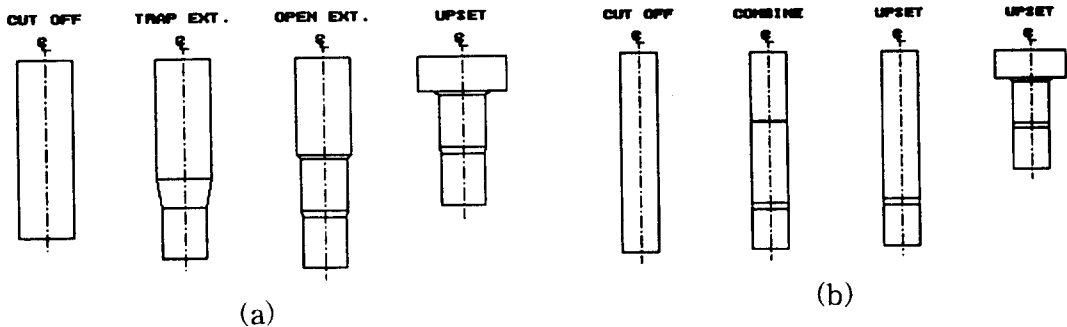


Fig. 8 Redesigned sequences by changing the weights of Fig. 3:
 (a) $w_1=100$, $w_2=10$, $w_3=10000$, $w_4=10$, and $w_5=10$, and
 (a) $w_1=10$, $w_2=10$, $w_3=10$, $w_4=10000$, and $w_5=10000$.

Fig. 10에는 탐색 가중치 외에도 제한 공정수를 변화시켜 설계된 공정을 나타내었다. Fig. 10(a)는 가중치를 모두 10으로 설정하고 제한 공정수를 2로 하여 재설계된 공정을 나타내었는데, Fig. 3과 비교하여 보면 3단계 공정의 1공정과 2공정이 동시에 수행되

있음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 8(a)와 탐색 가중치를 같게 하고 제한 공정수만을 2로 하였을 경우의 설계 공정을 Fig. 10(b)에 나타내었는데 3단계 공정의 2공정과 3공정이 단공정에 수행되었음을 알 수 있었다. 또한 탐색 가중치를 Fig. 10(b)와 같게 하고 제한 공정수만을 4로 하였을 경우의 설계 공정을 Fig. 10(c)에 나타내었다. 이 경우의 초기 소재 지름은 32.6mm였다.

성형수와 가중치 변화에 따른 재설계를 통하여 다양한 설계 공정을 얻을 수 있었다. 재설계된 공정은 기본 설계된 공정보다 우수한 경우도 있었으나 그렇지 않은 경우도 있었다. 따라서 가중치의 적절한 선정이 A* 탐색을 통한 설계에 매우 중요한 영향을 미칠 수 있었으나 가중치와 탐색 방향의 명확한 관계를 얻을 수는 없었다. 왜냐하면 비용 함수에 고려된 공정 변수들이 서로 종속적인 관계를 가지고 있으므로 i번째 가중치의 변화는 i번째 공정 변수에만 영향을 미치는 것이 아니라 다른 공정 변수에도 복합적인 영향을 미치기 때문이다. 가중치와 탐색 방향의 명확한 관계를 쉽게 알 수 없었기 때문에

본 연구에서는 적절한 가중치의 선정에 신경회로망 기법을 도입할 계획이다. 공정 변수와 가중치를 이용하여 신경회로망을 구성하고, 우수한 공정으로 판정된 설계 공정을 통하여 신경망 학습을 수행하면 우수한 공정을 설계할 때와 유사한 탐색 경향을 가지는 가중치의 선정이 가능할 것이다. 또한 우수 공정 판별 과정에서 각 생산 현장의 보유 기계나 설계 경험에 따라 선정되는 우수 공정이 상이할 수 있으므로 개발된 동일한 전문가 시스템에서 각각의 생산 능력에 따른 다양한 설계 공정을 얻을 수 있을 것이다.

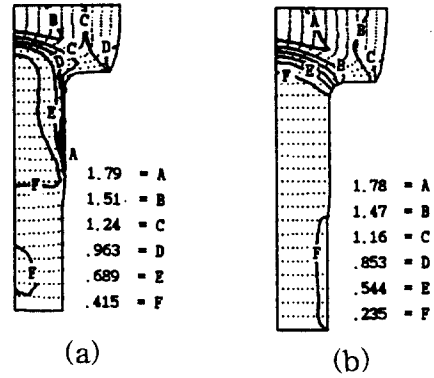


Fig. 9 Effective strain distributions of Fig. 8(a) and Fig. 8(b).

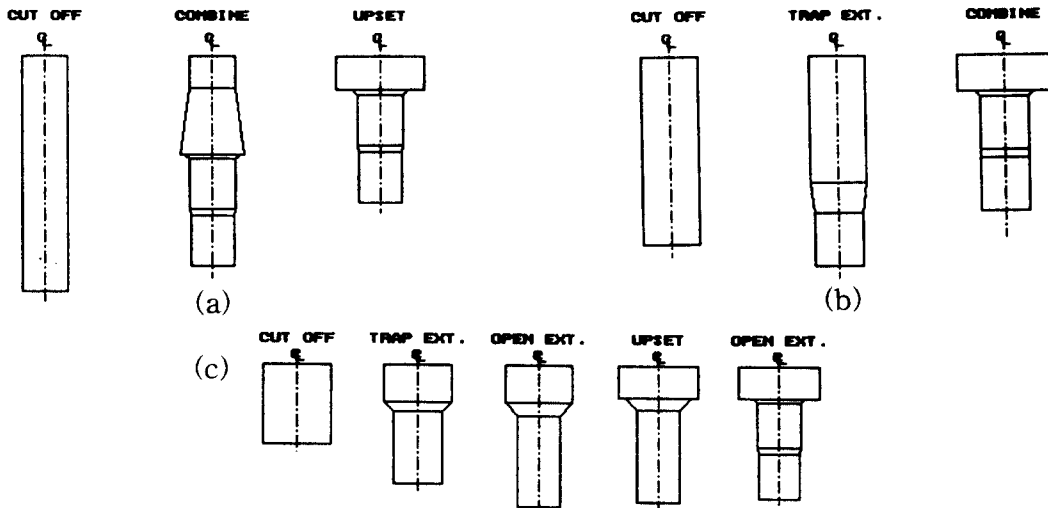


Fig. 10 Redesigned sequence by changing the number of stages: (a) Redesigned sequence of Fig.3, (b),(c) Redesigned sequence of Fig.8 (a).

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 실험과 유한요소해석을 통하여 전문가 시스템에서 설계된 공정의 신뢰성을 확인하여 보았으며, A* 탐색을 통한 재설계를 수행하여 개발된 시스템의 유연성을 검증하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 개발된 전문가 시스템을 통한 설계 공정에 대한 성형 실험을 통하여 결함없는 단조품을 얻을 수 있었다. 따라서 설계된 공정에 대해 전문가 시스템은 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.
- (2) 성형 실험과 유한요소해석을 통하여 초등식과 실험식을 통한 전문가 시스템의 공정 변수 계산 결과가 설계 단계에서 유용함을 알 수 있었다.
- (3) A* 탐색 알고리즘을 이용한 재설계를 통하여 다양한 설계 공정을 얻을 수 있었다. 성형수의 변화와 적절한 가중치의 선정으로 기본 설계 공정에 비하여 더 우수한 공정을 얻을 수 있었으나 가중치와 탐색 방향의 명확한 관계는 얻을 수 없었다.

6. 참고문헌

- [1] Lange, K., "Handbook of Metal Forming", MacGraw-Hill, NewYork, 1985.
- [2] ASM Handbook Committee, "Metals Handbook, Vol.5, Forging and Casting", ASM, Metals Park, Ohio, 1970.
- [3] T. Altan, S. I. Oh and H. L. Gegel, "Metal Forming, Fundamentals and Applications", ASM, Metal Park, Ohio, 1983.
- [4] K. Sevenler, P. S. Raghupathi and T. Altan, "Forming-Sequence Design for Multistage Cold Forging," J. Mech. Working Tech., Vol.14, 1987, pp.121-135.
- [5] W. Makosch and K. Lange, "Application-Orientated CAD System for Multi-Stage Tooling Design for Cold Forging," Proc. of 16th NAMRC, 1988, pp.63-70.
- [6] G. Yang and K. Osakada, "An Expert System for Process Planning of Cold Forging," Advanced Technology of Plasticity, Vol.1, 1990, pp.109-114.
- [7] N. Alberti, L. Cannizzaro and F. Micari, "Knowledge-Based Systems and F. E. Simulations in Metal Forming Processes Design An Integrated Approach," Ann. CIRP, Vol.40, 1991, pp.295-298.
- [8] H. K. Kim and T. Altan, "Computer-Aided Part and Processing-Sequence Design in Cold Forging," J. Mater. Process. Technol., Vol.33, 1992, pp.57-74.
- [9] 김홍석, 임용택, "재설계 기능을 갖는 냉간단조 공정설계용 전문가시스템 개발," 대한기계학회지, 제 18 권, 제 8 호, 1994, pp.2039-2052.
- [10] E. Rich and K. Knight, "Artificial Intelligence", McGraw-Hill, Singapore, 1991.
- [11] P. H. Winston, "Artificial Intelligence", Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [12] R. J. Schalkoff, "Artificial Intelligence: An Engineering Approach",