

PC기반 소성가공공정 성형해석 시스템 개발

곽대영* · 천재승* · 김수영* · 이근안* · 임용택*

(1999년 11월 17일 접수)

Development of PC-based Simulation System for Metal Forming

D. Y. Kwak, J. S. Cheon, S. Y. Kim, G. A. Lee and Y. T. Im

Abstract

It is well known that the quality and efficiency of the design of metal forming processes can be significantly improved with the aid of effective numerical simulations. In the present study, a two- and three-dimensional finite element simulation system, *CAMPform*, was developed for the analysis of metal forming processes in the PC environment. It is composed of a solver based on the thermo-rigid-viscoplastic approach and graphic user interface (GUI) based pre- and post-processors to be used for the effective description of forming conditions and graphic display of simulation results, respectively. In particular, in the case of *CAMPform* 2D (two-dimensional), as the solver contains an automatic remeshing module which determines the deformation step when remeshing is required and reconstructs the new mesh system, it is possible to carry out simulations automatically without any user intervention. Also, the forming analysis considers ductile fracture of the workpiece and wear of dies for better usage of the system. In the case of *CAMPform* 3D, general three-dimensional problems that involve complex die geometries and require remeshing can be analyzed, but full automation of simulations has yet to be achieved. In this paper, the overall structure and computational background of *CAMPform* will be briefly explained and analysis results of several forming processes will be shown. From the current results, it is construed that *CAMPform* can be used in providing useful information to assist the design of forming processes.

Key Words : Metal Forming, Finite Element Method, Thermo-rigid-viscoplastic Approach, Remeshing, Ductile Fracture, Wear, Pre/postprocessor

* 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

일반적으로 소성가공공정은 소재의 손실과 생산시간을 최소화하면서 기계적 성질이 우수한 제품을 생산하는 성형방법으로 알려져 있다. 이러한 소성가공공정에 대하여 성형공정 중에 발생할 수 있는 여러 가지 문제점을 예측하고, 설계 시에 이를 반영하기 위해서는 공정에 대한 정확한 이해가 필요하다. 이를 위하여 현재까지 여러 가지 실험적 방법 및 해석적 방법에 의한 공정해석이 시도되어 왔으며, 특히, 열강점소성에 의한 소성가공공정 성형해석은 대표적인 해석적 방법으로 이용되어왔다⁽¹⁾.

열강점소성 유한요소법을 이용하여 소성가공공정의 성형해석을 수행하기 위해서는 해석을 수행하기 위한 해석 모듈 뿐만 아니라 격자 재구성 모듈이 필요하다. 소성가공공정의 성형해석 시에 나타나는 대표적인 어려운 점들 중의 하나는 초기의 단순한 형상의 소재가 재료의 유동에 의해 복잡한 형상으로 변화하고, 국부적으로 집중된 변형에 의하여 격자 퇴화 (mesh degeneration) 현상이 발생함으로써 연속된 해석을 불가능하게 한다는 점이다. 이러한 경우에 원활하고 정확하게 해석을 계속적으로 수행하기 위해서는 퇴화된 격자 시스템을 새로운 양질의 격자 시스템으로 대체하고, 이전 격자 시스템에서의 각종 물리량들을 새로운 격자 시스템으로 사상하는 격자 재구성 과정이 수행되어야 한다. 이와 같이 소성가공공정의 성형해석을 위해서는 유한요소법 및 격자 재구성 기술이 확보되어야 한다.

한편, 현장에서 실제적으로 성형해석을 통한 공정설계를 수행하기 위해서는 공정해석에 필요한 해석 기술 뿐만 아니라 해석 시간 단축, 해석 자동화 및 사용자 편의성에 대한 기술 확보도 중요하다. 따라서, 해석 기술의 안정성 및 강건성 확보를 위한 연구가 수행되어야 하고, 또한, 해석에 사용될 유한요소 모델 및 해석 조건 등의 해석 정보를 생성하기 위한 전처리 모듈과 해석 결과를 효과적으로 가시화 할 수 있는 후처리 모듈의 개발이 필요하다. 이와 같이 소성가공공정의 공정설계에 도움을 주기 위한 성형해석을 수행하기 위해서는 전·후처리 모듈을 비롯하여 자동 격자 재구성 모듈 및 해석 모듈을 완전히 갖춘 소성가공공정 성형해석 시스템의 개발이 필요하다고 할 수 있다.

외국의 경우에는 이미 이러한 목적으로 SFTC사의 DEFORM 2D/3D 및 MARC Analysis Research Corporation의 MARC/AutoForge 등이 개발되어져 여러 단조 회사들에서 실제 공정설계에 성공적으로 적용되고 있다. 특히, 일본의 경우에는 히다찌 조선정보시스템과

일본 MSC, 스미모토 중기계공업의 3개 회사가 공동으로 상용 3차원 단조공정 성형해석 시스템인 GRADE/Forge를 개발하고 있다. 한편, 국내에서도 큐빅테크사가 상용 2차원 단조공정 성형해석 시스템인 AFDEX를 출시하였고, InteForm도 유사한 목적으로 개발되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 현장에서 실제적으로 사용될 수 있도록 PC환경 기반의 소성가공공정 성형해석 시스템, CAMPform을 개발하였다. CAMPform은 전처리 모듈, 해석 모듈 및 후처리 모듈로 구성되어져 있고, 해석 모듈은 2차원 및 3차원 열강점소성 유한요소법을 바탕으로 각각 사각형 및 육면체 요소에 대하여 개발되었다. 특히, 2차원 시스템의 경우에는 해석 모듈에 자동 격자 재구성 기능이 완전히 구현되어 사용자의 개입 없이도 해석을 완료할 수 있다. 이에 비하여 3차원 해석 시스템의 경우에는 격자 재구성 과정에 필요한 각각의 기능들은 구현되었지만, 완전한 자동 해석 시스템의 구현은 아직 이루어지지 못하였다. 한편, 전·후처리 모듈은 사용자 편의성에 중점을 두고 개발하여 유한요소법에 익숙하지 않은 사용자라 할지라도 원만히 사용할 수 있도록 하였고, 또한, 공정설계 과정에서 중요한 고려사항 중의 하나인 소재의 연성 파괴 및 급형의 마모 특성을 계산할 수 있도록 하였다. 이에 본 연구에서는 개발된 CAMPform을 사용하여 여러 가지 축대칭 및 3차원 성형해석을 시도하였고, 다양한 성형해석을 성공적으로 수행할 수 있었다. 이러한 사실로부터 개발된 CAMPform이 실제적인 성형해석에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

2. CAMPform의 구성

앞서 언급한대로 CAMPform은 Fig. 1과 같이 전처리 모듈, 해석 모듈 및 후처리 모듈의 세 부분으로 구성되어 있다.

우선, 전처리 모듈은 주로 다음 두 가지 기능을 수행한다. 첫째는 해석에 필요한 해석 조건을 부여하는 것으로서, 해석 모듈을 생성하거나 공정 변수 및 재료 상수를 설정하여 해석에 필요한 초기 입력 데이터를 생성하는 기능을 수행한다. 둘째는 사용자가 해석 과정을 조정할 수 있도록 해석 진행상황을 실시간으로 가시화하는 기능을 제공한다. 다양한 가시화 기능은 후처리 모듈에서 제공되기 때문에 전처리 모듈에서는 실시간으로 해석 진행 정도를 파악하기 위한 목적으로 변형 형상 가시화 기능이 제공된다. 이를 통하여 사용자가 필요하다고 판단하는 경우에 해석 수행을 중단하고, 해석 조건을

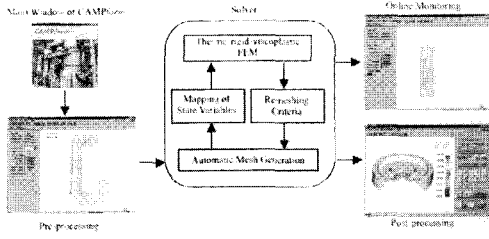


Fig. 1 Schematic diagram of the overall structure of CAMPform showing the procedure of analysis

변경하여 연속된 해석을 수행할 수 있도록 되어 있다. 해석 모듈의 경우에는 열강점소성 유한요소법을 근거로 개발되었으며, 격자 재구성 모듈을 포함하고 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 해석 과정 중에 격자 재구성 판별 기준을 적용하여 격자 시스템의 퇴화가 심하거나 혹은 급형과의 간섭이 일정한 값 이상이 되면 격자 재구성 과정을 수행하게 된다. 이와 같이 격자 재구성이 필요하다 판단되면, 먼저, 이전 격자 시스템을 대체하기 위한 새로운 격자 시스템 자동 생성 과정이 수행되고, 이전 격자 시스템에서 새로운 격자 시스템으로의 물리량 사상 과정이 수행된 후에 연속된 해석이 수행된다.

후처리 모듈은 소성가공공정의 여러 가지 성형해석 결과를 다양한 형태로 가시화할 수 있도록 다음의 기능들에 중점을 두어 개발되었다. 성형해석을 수행하였을 때 생성되는 응력, 변형률, 변형률 속도 및 온도 등의 해석 결과를 성분별로 등고선 및 컬러셰이딩 (color shading) 을 통하여 가시화 할 수 있도록 하였고, 속도를 나타내기 위한 벡터 가시화 기능 및 응력 및 변형률 등의 텐서 가시화 기능도 지원하고 있다. 또한, 소성가공공정 성형해석 시에 소재의 유동 양상을 관찰하기 위한 유동망 (flow net) 가시화 기능 및 하중-변위 곡선 가시화 기능을 지원하고 있다.

3. 이론적 배경

열강점소성 유한요소법의 지배방정식은 일반적으로 널리 알려져 있으므로^(1~3) 본 논문에서는 이에 관한 자세한 표현식은 생략하도록 한다.

일반적으로 격자 재구성 과정은 다음과 같은 세 가지 단계를 통하여 수행된다. 첫째, 해석 과정 중에 격자 재구성이 필요한 시점을 검출하여야 하고, 둘째로, 이전 격

자 시스템의 기하학적인 정보 및 해석적인 정보를 바탕으로 새로운 격자 시스템을 생성해야 한다. 마지막으로 유효 변형률 및 유효응력 등의 여러 가지 물리량들을 새로운 격자 시스템으로 사상하는 과정이 필요하게 된다^(4,5).

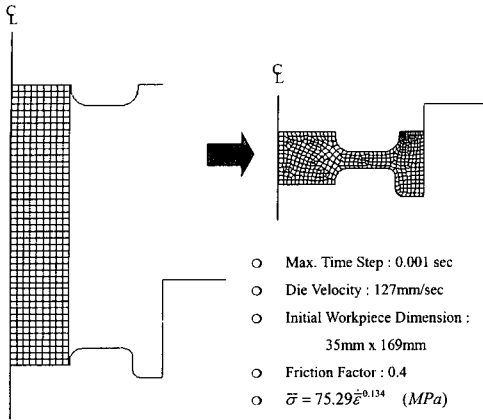
우선, 본 연구에서 개발된 CAMPform에서는 격자 재구성 판별 기준으로서 다음과 같은 기하학적인 특성을 고려하고 있다. 첫째로, 각 요소의 퇴화정도를 평가하여 퇴화가 심한 요소가 발견되면 격자 재구성을 수행하도록 하고 있고, 둘째로는 소재와 급형간의 간섭량이 일정한 값 이상이 되면 현재의 격자 시스템이 급형의 형상을 충분히 반영하지 못하는 것으로 판단하여 격자 재구성을 수행하게 된다.

이와 같이 격자 재구성이 요구되면, 이전 격자 시스템의 기하학적인 형상을 입력 조건으로 새로운 격자 시스템을 생성하게 된다. 특히, 격자 생성 시에 해석적 특성 및 급형의 기하학적인 특성이 고려될 수 있도록 유효 변형률 속도 분포를 반영하여 격자 밀도를 결정하였다. 한편, 앞서 언급된 바와 같이 CAMPform은 사각형 및 육면체 요소를 사용하고 있기 때문에 자동 격자 생성 시에는 2차원의 경우에는 회로법^(4,6)과 페이빙법⁽⁷⁾에 근거한 사각형 격자 생성이 이루어지고, 3차원의 경우에는 마스터그리드법⁽⁸⁾ 및 옥트리에 의한 격자 세분화법⁽⁹⁾에 의하여 육면체 격자가 자동적으로 생성된다. 이와 같이 새로운 격자가 생성되면 물리량 사상 과정을 최종적으로 수행하게 된다.

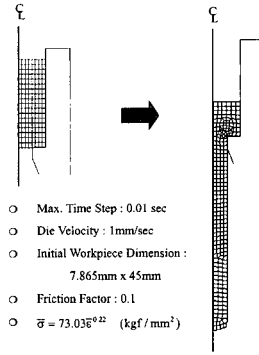
CAMPform에서는 2차원의 경우에 이와 같은 일련의 격자 재구성 과정의 안정성 및 강건성이 확보되어 해석 진행 중에 사용자의 개입이 전혀 없더라도 해석을 완료할 수 있도록 자동화가 이루어져 있다. 그러나 3차원의 경우에는 육면체 격자 생성의 기하학적인 어려움 때문에 현재까지는 완전한 자동화가 이루어지진 못하였고, 이에 관한 계속된 연구를 진행중이다.

한편, 냉간단조 공정설계에서 중요한 설계 고려사항 중의 하나인 연성파괴는 실제 성형과정에서 가능한 최대 변형률을 제한하는 요인으로 작용하게 된다. 이와 관련하여 여러 가지 연성파괴 예측식들이 제안되었고, CAMPform에서는 에너지량에 근거한 소성일 가설 및 Cockcroft-Latham식을 파괴 예측식으로 사용하고 있다⁽¹⁰⁾.

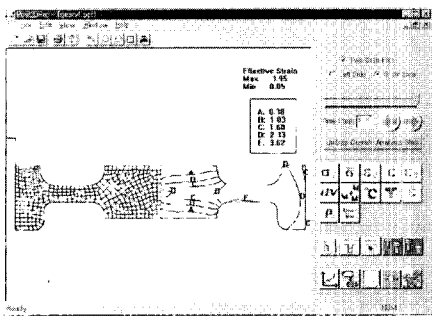
또한, 소성가공공정에서 생산 제품의 치수 정밀도 및 급형 수명에 큰 영향을 미치는 마모량을 계산하기 위해서 CAMPform에서는 Archard의 응착마모 (adhesive wear) 모델을 사용하고 있다⁽¹¹⁾.



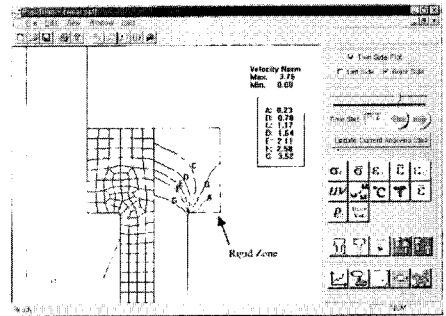
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 2 Analysis of closed-die forging of gear blank: (a) analysis conditions and (b) analysis results of final deformed shape and distribution of effective strain

Fig. 3 Analysis of flat die extrusion: (a) analysis conditions and (b) analysis results of final deformed shape and distribution of velocity norm

4. 성형해석 예제

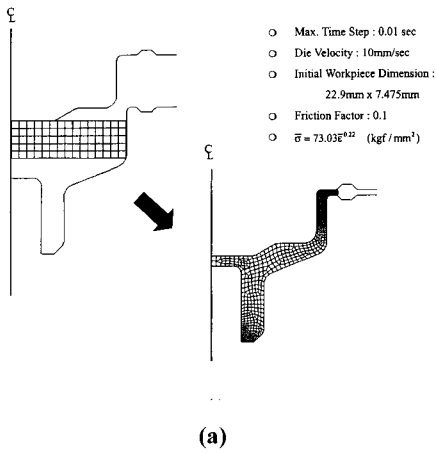
4.1 축대칭 성형해석

본 연구에서는 개발된 CAMPform의 적용성 및 유용성을 검증하기 위하여 몇 가지 축대칭 예제에 대한 성형해석을 수행하였는데, 각각의 해석 조건 및 해석 결과를 각각 Fig. 2에서 Fig. 6에 나타내었다.

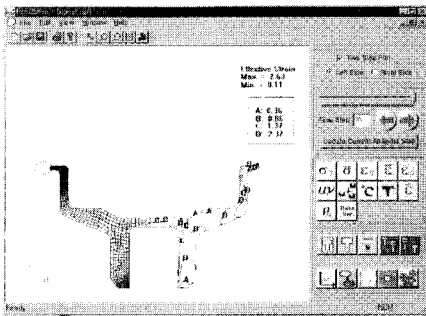
첫 번째 예제는 기어 블랭크 폐쇄단조공정의 성형해석으로서 Fig. 2(a)와 (b)에 각각 성형해석을 수행하기 위한 해석조건 및 해석결과를 각각 나타내었다. 이 해석은 급형의 기하학적 형상이 간단하여 비교적 해석이 용이한

경우로서 격자 재구성 과정이 원활히 수행되는지를 검증하기 위하여 수행되었다. 해석은 AISI 8620 재료에 대하여 수행하였고, 해석에 사용된 물성치는 참고문헌⁽¹⁾에서 인용하였다. Fig. 2(b)는 성형 후의 변형형상 및 유효 변형률 분포를 나타낸 것으로, 최대 유효 변형률은 3.95이었고, 그림에 나타난 바와 같이 소재가 완전히 채워짐을 확인할 수 있다. 특히, 이 해석의 경우에 해석 과정에서 발생된 파괴 손실은 0.78%로 계산되었다.

두 번째 예제는 평균형 압출공정에 대한 성형해석으로 AISI 1010⁽¹²⁾ 재료를 사용하였고, 해석조건은 Fig. 3(a)에 나타내었다. 이 해석은 그림에 나타난 바와 같이 하부급형 출구부분의 수직한 모서리 부분에서 소재 유동에 의한 과도한 변형 및 소재 급형간의 간섭이 계속적으로 발



(a)

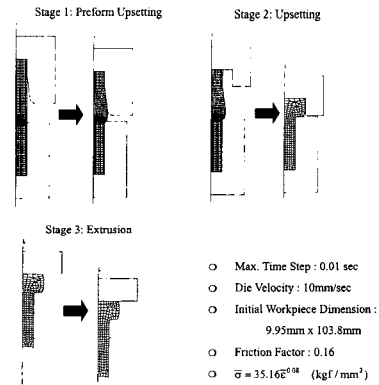


(b)

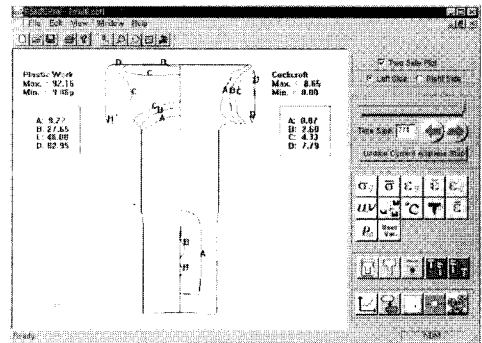
Fig. 4 Analysis of clutch hub forging: (a) analysis conditions and (b) analysis results of final deformed shape and distribution of effective strain

생하게 된다. 따라서 전체 해석 과정 동안에 격자 재구성이 계속적으로 요구되는 비교적 해석 수행이 어려운 경우이다. 본 연구에서는 CAMPform을 사용하여 해석을 성공적으로 수행할 수 있었고, 해석 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 그림에서는 속도 크기 분포를 나타낸 것으로서 하부 급형 출구 오른쪽 코너에서 강제 영역 (rigid zone)이 형성됨을 확인할 수 있었다. 특히, 이 해석에서는 해석이 수행되는 동안의 파괴 손실은 0.34%로 계산되었다.

Fig. 4는 자동차 부품 중의 하나인 클러치 허브의 성형해석의 해석 조건 및 해석 결과이다. 이 해석은 그림에 나타난 바와 같이 소재의 유동이 전·후방 압출의 형태로 나타나는 경우이다. 해석조건은 Fig. 4(a)에 나타내



(a)



(b)

Fig. 5 Analysis of multi-stage pin-shape forging: (a) analysis conditions and (b) analysis results of distributions of ductile fracture damage values based on both plastic work hypothesus and Cockcroft-Latham criteria

었고, 소재로는 평균형 압출공정과 동일하게 AISI 1010을 사용하였다. Fig. 4(b)의 해석 결과에서 알 수 있는 바와 같이 최대 유효 변형률은 2.63이었고, 파괴 손실은 0.33%이었다.

Fig. 5는 다단계 핀 형상 성형해석을 수행하기 위한 해석조건 및 해석 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 이 공정은 예비 성형체 성형, 업세팅 및 전방 압출의 세 단계로 이루어진 공정으로 전문가 시스템인CAMPxpert⁽¹³⁾에 의해서 설계되었고, 소재로는 알루미늄 합금 6061을 사용하였다. 이 공정의 경우에는 특히, 두 번째 업세팅 공정 시에 핀 머리 부분에서의 연성파괴 발생 가능성이

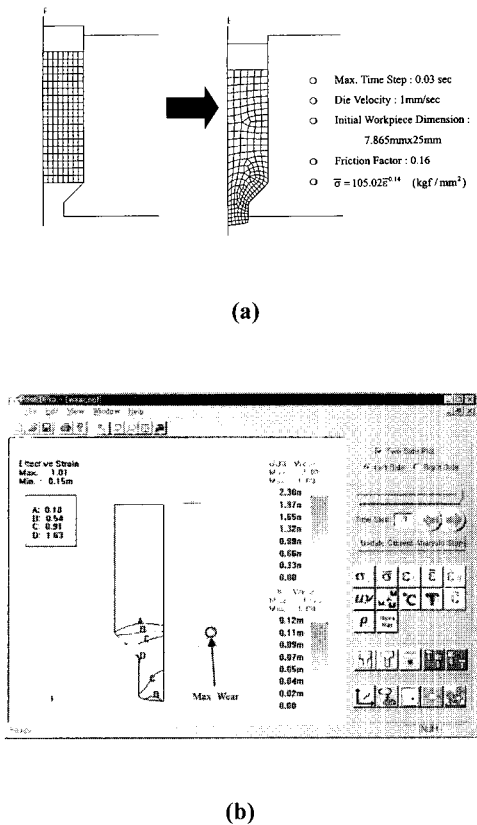


Fig. 6 Analysis of tool wear profile: (a) analysis conditions and (b) analysis results of distribution of wear depth based on Archard's adhesive wear model

존재하기 때문에 공정설계 시에 이에 대한 고려가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 이를 고려하여 성형해석을 수행하면서 소성일 및 Cockcroft-Latham식에 의한 변형 에너지량을 계산하였고, 이를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 최대값은 각각 92.16 kgf/mm^2 및 8.65 kgf/mm^2 으로 계산되었다. 알루미늄 합금 6061의 경우, 실험에 의하여 얻어진 C_1 과 C_2 값이 각각 93.69 kgf/mm^2 및 8.65 kgf/mm^2 인 사실⁽¹⁰⁾과 비교해 볼 때, 연성과파괴가 일어날 가능성이 있음을 알 수 있었다. 이 해석에서의 부피 손실은 0.1%로 계산되었다.

마지막 예제는 전방압출 공정에 대한 성형해석으로서 이 해석에서는 급형수명과 관련된 마모량을 계산하였다. 앞서 언급한 바와 같이 CAMPform에서는 Archard의 응착마모 모델을 사용하고 있기 때문에 이 모델에 의한 마모량을 계산하였다. 이 해석은 소재 재료로서 AISI

1045⁽¹²⁾를 사용하여 수행되었고, Fig. 6(a)와 (b)에서는 각각 해석조건 및 계산된 마모량 분포를 나타내었다. 급형의 최대 마모량은 그림에 표시된 부분에서 발생하였고, 이때 최대 마모량은 0.00012 mm 이었으며, 부피 손실은 0.22%이었다.

4.2 3차원 성형해석

3차원 해석의 경우에는 다음의 두 가지 예제에 대한 성형해석을 수행하였다. 첫 번째 예제는 널리 알려진 3차원 벤치마크 문제로서 격자 재구성 과정이 필요한 대표적인 해석으로 CAMPform의 육면체 격자 재구성 기능을 검증하기 위하여 수행하였다. 두 번째는 스와시 플레이트 (swash plate) 성형해석으로서 일반적인 금속성형의 비압축성인 경우와 분말금속성형의 압축성인 경우에 대하여 해석을 수행하여 비교하였다.

Fig. 7은 벤치마크 예제의 해석조건을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이 해석은 예비성형체 압세팅 및 후방압출의 두 단계로 수행된다. 특히, 후방압출 공정에서 격자 재구성이 요구되는 것으로서 Fig. 8은 후방압출 해석 과정에서 격자 재구성을 수행했을 때의 이전 격자시스템과 새로이 생성된 격자시스템을 나타낸 것이다. 앞서 언급된 바와 같이 격자 재구성을 수행하기 위한 육면체 격자 생성은 마스터그리드법에 근거하여 요소의 크기가 일정한 격자 시스템이 생성되도록 하였고, 옥트리에 의한 격자 세분화 과정은 수행되지 않았다. 그림에 나타난 바와 같이 격자 재구성 과정은 31%,

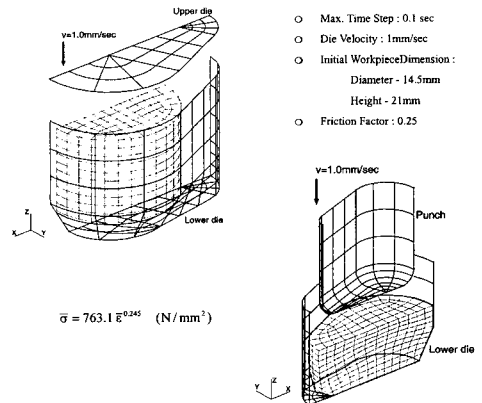


Fig. 7 Analysis conditions of three-dimensional benchmark problem

45%, 67%, 74% 및 97%의 범위에서 다섯 번에 걸쳐서 성공적으로 수행되었다. 한편, Fig. 9는 해석 후의 유효 변형률 분포를 나타낸 것으로 최대 유효 변형률은 2.83로 계산되었다.

Fig. 10은 스와시 플레이트 성형해석의 해석조건을 나타낸 것이다. 앞서 언급된 바와 같이 이 예제의 경우, 압축성 및 비압축성 재료에 대한 두 가지 해석을 동시에 수행하여 결과를 비교하였다.

특히, 비압축성인 경우에는 초기 상대밀도 (relative density) 값으로 0.8을 사용하였다. Fig. 11은 압축성 및 비압축성인 경우에 대한 변형해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 비압축성인 경우에 비하여 압축성인 경우가 정량적으로 많이 압축되어 있음을 확인할 수 있다. 정량적으로는 최종성형 후에 압축성인 경우, 초기 부피에 대한 최종 부피의 부피 감소

율은 20.8%로 계산되었고, 전체 부피가 비압축성인 경우의 전체 부피의 79.8%로 계산되었다. 또한, 최대 유효 변형률의 경우에도 비압축성인 경우와 압축성인 경우에 각각 2.11 및 1.72로 나타남으로써 압축 효과에 의해서 압축성 재료인 경우가 유효 변형률이 낮게 계산됨을 알 수 있었다.

Fig. 12는 압축성 재료의 경우에 최종성형 후의 상대 밀도 분포를 나타낸 것으로 그림에서 표시된 부분은 상대밀도가 낮게 계산된 부분으로 상대적으로 취약한 부분이 됨을 예측할 수가 있다.

이와 같이 본 연구에서는 CAMPform을 사용하여 두

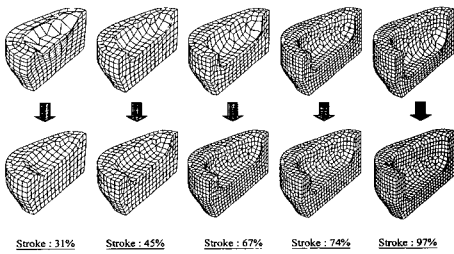


Fig. 8 Configurations of the original and reconstructed mesh systems during the second backward extrusion process of benchmark problem

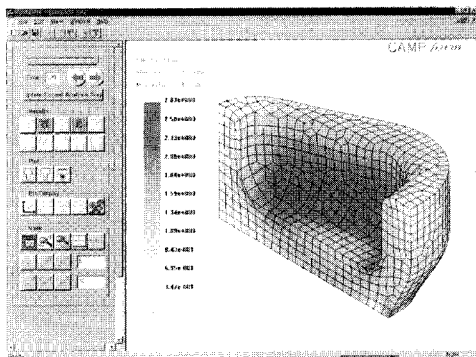


Fig. 9 Results of effective strain distributions for the three-dimensional benchmark problem

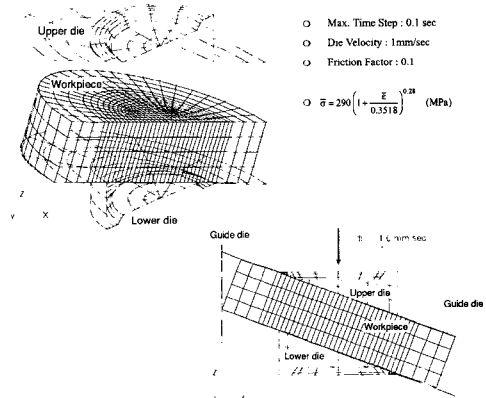


Fig. 10 Analysis conditions of swash plate P/M forming

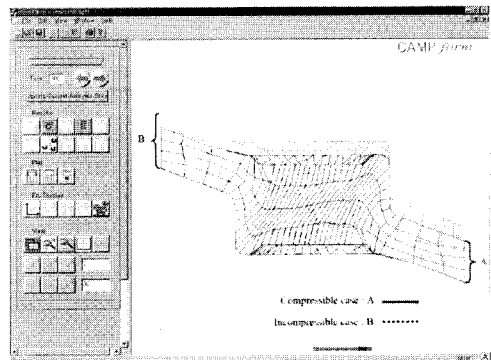


Fig. 11 Comparison of final deformed shapes between compressible and incompressible analyses of swash plate P/M forming

가지 다른 공정에 대한 3차원 성형해석을 성공적으로 수행할 수 있었고, 이를 통해 개발된 CAMPform의 3차원 유한요소해석의 적용성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 PC기반의 소성가공공정의 성형해석 시스템 CAMPform을 개발하였고, 개발된 CAMPform을 사용하여 여러 가지 성형해석을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 개발된 CAMPform을 이용하여 기어블랭크, 평균형 압출 및 클러치 허브, 핀 등의 다양한 성형해석을 1% 이내의 부피손실 하에서 성공적으로 수행할 수 있었고, 특히, 자동 격자 재구성 모듈에 의하여 해석과정 중에 사용자의 개입 없이 자동적으로 해석을 완료할 수 있음을 확인하였다.

(2) 다단계 핀 형상 단조공정 및 전방압출공정의 성형해석을 수행하고, 이를 통해 각각 연성파괴 및 금형 마모에 대한 해석 결과를 얻음으로써 개발된 CAMPform이 실제 공정설계 과정에서 소재의 연성파괴 및 금형마모를 고려하기 위한 목적으로 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

(3) 3차원 벤치마크 예제의 성형해석을 통하여 CAMPform의 육면체 격자 재구성 기능이 실제 문제에 성공적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

(4) 압축성 및 비압축성 재료를 이용한 스와시 플레이트의 3차원 성형해석을 통하여 압축성인 재료를 사용한

경우가 비압축성인 경우에 비하여 최대 유효 변형률의 크기가 낮게 계산됨을 알 수 있었고, 또한, 분말금속성형의 경우에 상대밀도의 분포를 통하여 상대적으로 취약한 부위를 예측할 수 있었다.

후 기

이 논문은 1999년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, Metal forming and the finite element method, Oxford University Press, New York.
- (2) Im, Y. T. and Kim, S. Y., 1998, "Three-dimensional finite element simulations of forming processes", Proceedings of 6th Japan-China Joint Symposium on Precision Forming, Nagoya, Japan, October 5, 1998, pp. 91~96.
- (3) Kwak, D. Y., Cheon, J. S., Kim, S. Y., Lee, G. A. and Im, Y. T., 1999, "Development of automated simulation system for forming", Int. Symp. Adv. Forming and Die Manufac. Tech., Pusan, Korea, pp. 327~332.
- (4) Joun, M. S. and Lee, M. C., 1997, "Quadrilateral finite-element generation and mesh quality control for metal forming simulation", Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 40, pp. 4059~4075.
- (5) 곽대영, 임용택, 1998, "격자 재구성을 위한 사각형 요소 자동 격자 생성기 개발", 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제9호, pp. 1639~1653.
- (6) Talbert, J. A. and Parkinson, A. L., 1990, "Development of an automatic two-dimensional finite element mesh generator using quadrilateral elements and Bezier curve boundary definition", Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 29, pp. 1551~1567.
- (7) Blacker, T. D. and Stephenson, M. B., 1991, "Paving : A new approach to automated quadrilateral mesh generation", Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 32, pp. 811~847.

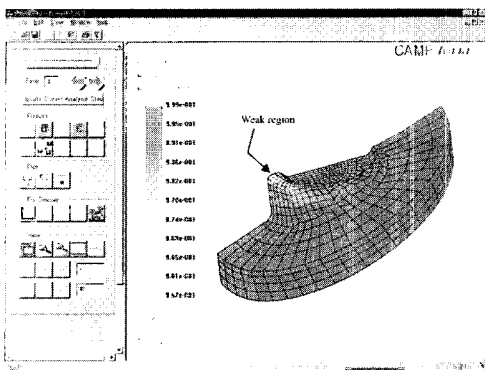


Fig. 12 Results of relative density distribution for compressible analysis of swash plate P/M forming

- (8) Lee, Y. K. and Yang, D. Y., 1999, "Development of a grid-based mesh generation technique and its application to remeshing during the finite element simulation of a metal forming process", *Engineering Computations*, Vol. 16, pp. 316~336.
- (9) Schneiders, R., Schindler, R. and Weiler, F., 1996, "Octree-based generation of hexahedral element meshes", *Proceedings of 5th International Meshing Roundtable*, Pittsburgh, USA, October 10, pp. 205~215.
- (10) Kim, H. S., Im, Y. T. and Geiger, M., 1999, "Prediction of Ductile Fracture in Cold Forming of Aluminum Alloy", *Transactions of ASME - B - Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 121, pp. 336~344.
- (11) Lee, G. A. and Im, Y. T., 1999, "Finite-element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 89, pp. 123~127.
- (12) Altan, T., Oh, S. I. And Gegel, L., 1983, *Metal Forming Fundamentals and Applications*, American Society for Metals, Metals Park.
- (13) Kim, H. S. and Im, Y. T., 1996, "Multi-stage Cold Forming Process Design with A* Searching Algorithm", *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of Society of Manufacturing Engineers*, Vol. 24, pp. 161~166.