

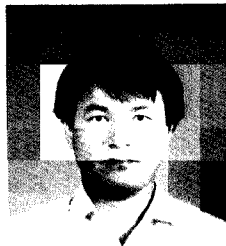
Bulk성형에서의 CAD/CAM/CAE



양 동 열

(한국과학기술원 교수)

- '73. 2 서울대학교 공과대학 기계공학 학사
- '75. 8 한국과학기술원 기계공학 석사
- '78. 8 한국과학기술원 기계공학 박사
- '78. 9-'83. 2 한국과학기술원/한국과학기술원 조교수
- '83. 3-'88. 2 한국과학기술원 부교수
- '88. 3-현재 한국과학기술원 교수 ~
- '81. 3-'82. 6 Metal forming Institute, Stuttgart University, Research fellow
- '86-'88. 3 한국중공업 기술자문위원
- '88. 5-'89. 3 Materials forming Institute(CEMEF) Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris 객원연구원



박 치 용

(한국과학기술원 생산공학과)

- '88. 2 부산대학교 공과대학 생산기계공학과 학사
- '90. 2 한국과학기술원 생산공학과 석사
- '90. 3-현재 한국과학기술원 박사과정

1. 서 론

오늘날과 같이 제품이 다양하고 모델 변화가 빈번할 뿐 아니라 제품의 주기와 납기가 짧아지는 경향에 대비하기 위해서는 도면작업에 의한 금형설계를 점차 CAD/CAM체제로 바꾸는 것이 경제적이며, 실제로 많은 회사에서 CAD/CAM체제를 효율적으로 운영하고 있다. CAD/CAM 기술의 효율적 적용과 더불어, 제품의 개발공정에 포함되어 있는 공학부분(engineering parts)을 완전 자동화하기 위해서는 CAE의 필요성이 절실하여진다.

제품의 개발시에나 금형의 설계시에 제품의 성형성을 향상시키고 금속학적, 기계적, 물리적인 성질등을 예측하거나, 소재의 절약을 위해서는 bulk성형에서 CAE 적용이 날로 증가되어지고 있다. 이는 유한요소법과 같은 수치해석 기법의 발달 및 컴퓨터 처리속도 향상의 도움으로 이루어지고 있다.

Bulk성형에 있어서 공정의 개선 및 소재결함 방지를 위해서는 금형의 설계 및 가공에 대한 연구가 필수적이며, 이는 CAD/CAM/CAE를 이용하여 금형의 설계 및 가공에 이르기까지 효율적으로 행할 수 있는 연구가 많이 진행되어야 한다. 따라서, 여기에서는 bulk성형에서 대표적 두 공정인 단조와 압출공정에서 제품의 개발, 공정의 향상을 위한 CAE의 적용 및 금형의 CAD/CAM, 금형의 설계제작등에 관하여 살펴보고자 한다.

2. 금형의 CAD/CAM

금형을 설계하기 위한 일상적인 방법은 실험적인 결과나 경험과 직관에 의존하는 방법이다. 그러나

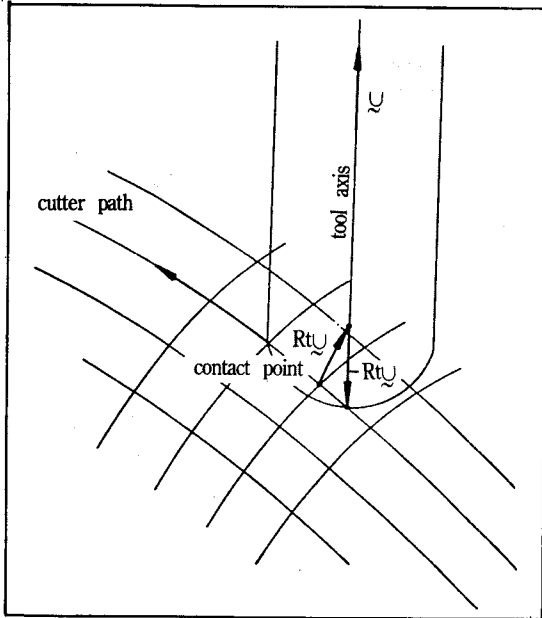


그림 1) 금형면과 공구의 위치

최근에 컴퓨터 원용설계(computer aided design)의 방법을 이용하여 (a) 성형하중을 예측하고 (b) 소재유동을 예측하고 (c) NC가공으로 금형을 제작한다. 축대칭 금형과는 달리 3차원 형상의 금형은 그 기하학적 복잡성으로 인해 일반 범용선반이나 밀링기에 의해서는 가공이 불가능하게 된다. 그러므로 CAD/CAM시스템을 이용하여 요구곡면과 같은 형상의 전극봉을 수치제어 밀링기에 전극봉을 가공하려면 NC프로그램을 작성하여 공구의 경로나 절삭방법등을 입력하여 주어야 하는데, 이에 앞서 주어진 자유곡면을 어떤 공구로 어떻게 절삭해야 할지를 컴퓨터로 미리 시뮬레이션(simulation)해 보아야 한다. 공구위치 데이터(cutter location data: CL data)는 가공하고자하는 전극봉의 기하학적 모양에 대한 데이터와 사용할 공구의 종류와 치수, 곡면의 편차량(offset), 가공공차등을 고려하여 계산하는데, 임의 곡면을 볼 앤드밀(ball-end mill)을 사용하여 가공하는 경우를 예로들면 그 방법은 다음과 같다. 그림 1)에서, 자유곡면에서의 단위법선벡터를 n , 공구방향의 수직단위벡터를 u , 공구의 반경을 R_t 이라고 하면, 실제공구의 궤적을 나타내는 벡터 r_{α} 은 다음식으로 표현된다.

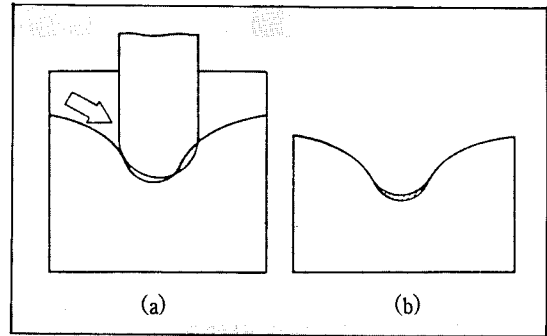


그림 2) 공구의 간섭현상(a)과 제거(b)

$$r_{\alpha} = r + R_t(n - u)$$

여기서 r 은 가공하고자하는 소재의 곡면이다. 이렇게 구해진 CL데이터로 공구경로(tool path)를 컴퓨터로 그려보면, 가공곡면의 오목한 곳의 곡률반경이 공구의 반경보다 작은 경우에는 그림 2(a)와 같은 간섭(interference)현상이 발생한다. 이런 간섭현상을 제거하고(그림 2(b)) 혹은 있을 지도 모를 공구경로의 오차를 점검한 후, 사용하고자 하는 수치제어 밀링기에 맞도록 프로그램하여 전극봉을 가공하게 된다.

3. 단조에서의 CAD/CAM/CAE

현상이 복잡한 단조금형을 가공하려면, 축대칭의 형상인 경우 NC선반을, 3차원 형상인 경우 NC 밀링을 주로 이용한다. 형상의 복잡도에 따라서는 연삭하거나 래핑(lapping)하는데 많은 시간과 비용이 소모되어 진다. 이렇게 제작된 금형을 이용하여 현장에서 단조 실험한 결과 제품의 불량이나 금형의 파손등이 일어난다면 금형제작에 소요된 시간과 비용의 손실을 가져오게 된다. 따라서 금형의 설계에는 많은 현장경험과 더불어 정확한 공학적 해석이 필요하여지게 된다.

금형설계를 크게 기하학적 설계와 컴퓨터 원용 시뮬레이션에 의한 설계로 나눌 수 있다. 기하학적 설계는 금형의 소재의 기하학적인 형상을 고려한 방법이고 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 설계는 소재의 변형유동 및 단조하중 등의 예측을 위한 소성역학적 해석에 의한 방법이다. 이와 같이 단

조금형의 설계에 CAD/CAM/CAE를 적용함으로써, 컴퓨터에서 금형의 형상을 마음대로 바꾸어 해석 및 설계를 행하여 본 후, 원하는 제품의 성형이 가능할 때 실제로 금형을 제작하여 금형의 설계 및 가공시행 착오를 최대한 줄이도록 할 수가 있다.

3.1. 기하학적 설계

단조금형설계를 위해 가장 중요한 정보는 단조품의 기하학적 형상이다. 또 단조품의 형상은 최종제품의 형상으로부터 그 형상이 단조가 가능하도록 수정함으로써 얻어질 수 있다. 이와 같은 단조품 형상의 설계과정에서 필요한 단조품의 외곽치수, 코너 반경, 적절한 여유각등이 최종제품의 형상에 첨가된다. 이러한 기하학적인 처리는 CAD/CAM 시스템에서 잘 수행되어진다. 이러한 시스템들은 상업적으로 판매되고 있으며 컴퓨터 원용 제도(drafting)와 NC가공을 위한 소프트웨어를 제공하고 있다. 단조공정에서 금형을 설계하는 데에는 3차원적 단조품의 주요단면을 고려하여야하나, 기하학적인 설계의 방법에 의해서는 단조공정의 3차원적인 해석은 이론적으로 복잡하고 계산시간이 많이 들므로 2차원적으로 간략화시켜 단면단위로 설계한다. 단면에서의 금속유동이 평면변형 상태이거나 축대칭 상태라고 가정하는데 이에 대한 예가 그림3에 있다.

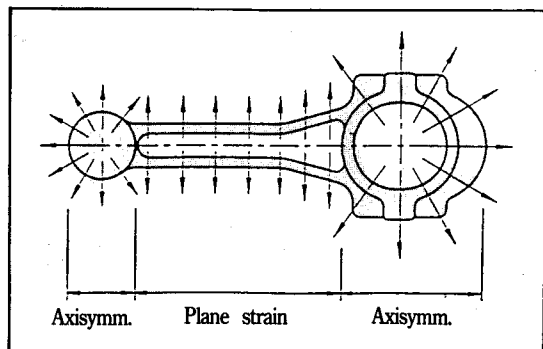


그림 3) 재료의 유동방향

다단계 단조금형 장치에서 최종금형의 단계로부터 보통 슬랩방법에 의해 단조하중을 예측하고, 예측된 하중으로부터 적당한 프레스를 선정한다.

다음 금형이 파손되지 않도록 설계한다. 또한 기하학적 설계에서 중요한 것은 플래쉬(flash)의 치수를 정확히 하는 것이다. 플래쉬의 형상은 금속의 유동을 제한하여 소재내부의 유동을 좋게 하도록 설계한다. 그 결과 플래쉬로 인해 단조하중이 크게 증가하므로 설계자는 타협점을 찾아 설계해야 한다. 전통적으로 금형은 설계자의 경험에 의해 설계하고 실험에 의하여 수정한다. 그러나 이때에도 마찬가지로 실험적인 규칙이 적용되어진다. 이러한 방법에 의한 단조가공에 대한 CAD/CAM의 컴퓨터 시스템으로는 N. Akgerman, T. Altan 등에 의해 개발된 터어빈과 압축기의 블레이드를 단조하기 위하여 자동으로 금형의 설계와 제도를 하는 "BLDFORG", 바틸연구소에서 개발된 정밀 등온단조에서 단이 진 "L" 형태의 예비성형설계를 하는 "DIEFRG", 자동 예비성형 다이설계프로그램을 리브-웹브 형상에 대하여 지식 베이스 시스템에 기초하여 개발된 "BID", 자동차 부품 및 다른 복잡한 부품의 금형단조에 적용할 수 있는 시스템등 많은 시스템들이 개발되었다. 국내에서는 부산대에서 CAD용 언어인 AutoLISP 언어를 이용하여 정밀단조에 대한 설계변수나 방법을 컴퓨터에 디스플레이(display)되게하여 사용자가 화면에서 수정 가능하도록 하는 연구가 수행되어진 바 있다.

3.2. 컴퓨터원용 시뮬레이션

3.2.1. 단조금형 및 공정의 설계

최근에 유한요소법을 이용하여 단조공정을 시뮬레이션하는 기법이 개발되어 왔다. 이 유한요소법의 가장 큰 장점은 소재형상에 거의 제한이 없이 거의 일반적으로 적용할 수 있는 응용성에 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해서는 유한요소를 이용하여 소재형상을 분할하고 적절한 경계조건을 부여하여야 한다. 따라서 bulk가공에 있어서 유한요소의 장점을 최대한 이용할 수 있도록 금형의 경계조건을 처리하는 해석방법들이 개발되어 왔다 [1]. 이러한 방법들을 이용하여 임의의 형상을 가지는 금형에 의한 단조공정의 해석이 가능하게 되었고, 근 해석 결과 소재의 유동형상, 속도분포,

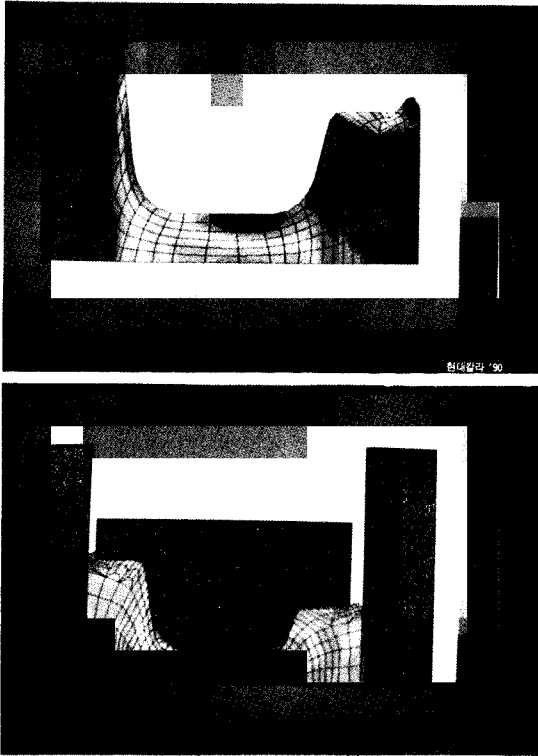
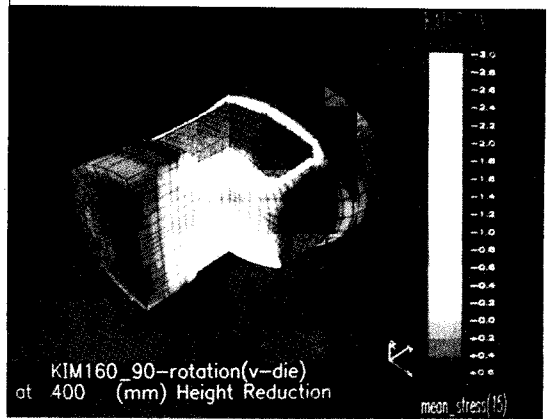
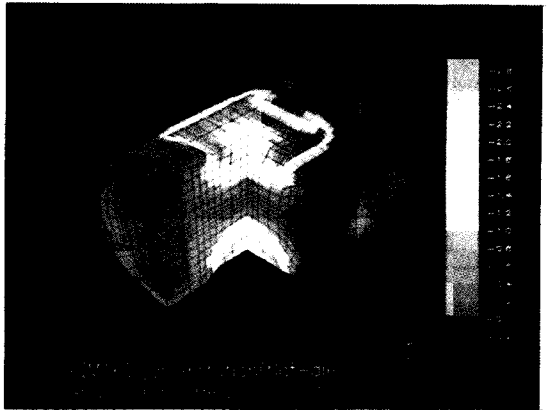


그림 4) 크랭크 웹의 열간단조

변형도와 응력분포 및 온도분포의 예측이 가능하게 되었다. 이러한 계산 결과는 단조공정 및 금형설계에 매우 중요하다. 유한요소법의 입력 데이터와 결과에 대한 그래픽 표현은 컴퓨터원용설계에서 중요한 부분중의 하나이다. 그림4는 프랭크 웹의 열간단조를 행할 때 터미널상에 나타난 온도분포 및 유효변형율의 분포를 나타내고 있다. 유한요소해석의 결과를 그래픽 터미널에서 확인해 봄으로서 설계자는 유도형상과 물성치를 눈으로 확인할 수 있게 된다. 그림5와 그림6은 열간상태의 대형 강괴를 cogging한 후 업셋팅하는 단조공정에서 금형의 형상에 따른 물성치의 변화를 연구하기 위한 해석의 예이다[2]. 이러한 해석의 결과로 금형공정의 개발 또는 개선을 행할 수 있고 적절한 금형을 설계할 수가 있다. 설계된 금형은 CAD시스템에 의하여 가공되어지는데 금형의 묘사 및 최종제품의 형상을 CAD에 의해서 표현한 예가 그림7에 그 예제를 보이고 있다[3]. 이 CAD시스템에 의해서 표현된 것은 블레이드의



(a)



(b)

그림 5) V형 금형(a), 평금형(b)을 이용한 cogging공정

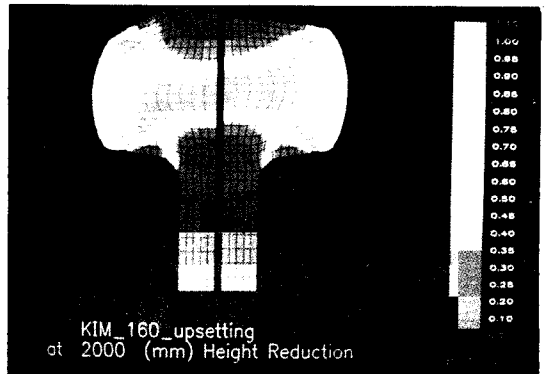


그림 6) 상부금형이 다름 때의 업셋팅 공정

상하부 금형과 최종제품으로 예측할 수 있는 블레이드의 형상을 나타내고 있다.

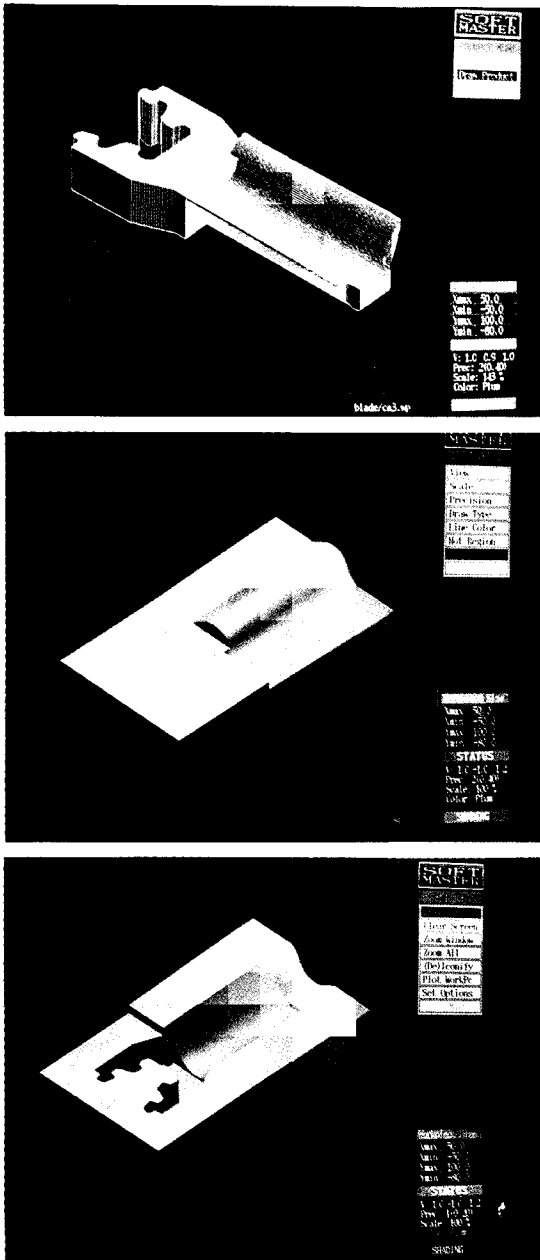


그림 7) CAD시스템에 의한 블레이드 및 금형모사

3.2.2. 단조공정의 CAE

유한요소법을 단조공정에 효과적으로 적용하여 단조공정의 개선 및 금형의 설계에 유용한 데이터를 얻을 수 있다. 그런데 해석에 있어서 계산의 가속적 수행이 불가능하여 효율적인 적용을 가로막는 것이 격자재구성(remeshing)이다. 단조공

정이 특성상 복잡한 형상의 금형에 의한 공정이나 금형형상이 간단하더라도 유동이 복잡한 공정에서는 유한요소 격차가 어느 정도 이상 왜곡(distortion)을 일으키게 되거나 유한 요소격차가 금형형상과 간섭을 일으킬 경우가 많다. 이때에는 유한요소 격차를 재구성하여 시뮬레이션을 계속 진행해야 하며 이 과정을 격자재구성이라 한다. 프로그램에 의한 해석도중 격자재구성이 필요하여지면 전체 계산을 수행하는데 많은 시간을 필요로 하게 된다. 이의 효율적 개선을 위한 방법으로 계산시간의 경제성과 물리적 특성을 고려한 모% (module)을 이용한 단위체 격자 재구성법(modular remeshing)이 제안되었다[4]. 단위체격자 재구성법을 이용하여 베벨치차의 3차원 단조에 대한 결과로서 유효변형을 분포가 그림8에 나타나 있다.

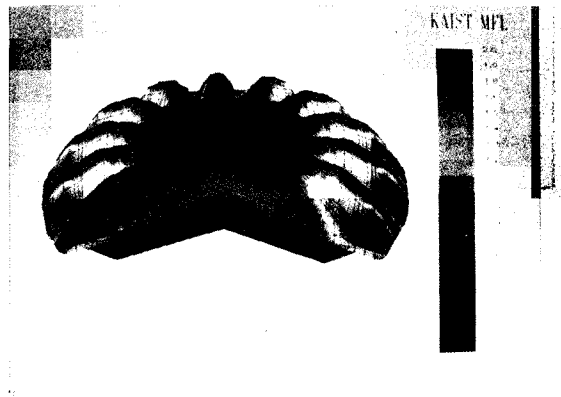


그림 8) 단위체 격자 재구성을 이용한 베벨치차 단조

전문가 시스템(expert system)과 단위체 격자 재구성법의 결합으로 사용자가 편리하게 격자 재구성을 할 수 있게 만든 시스템의 흐름도가 그림9에 나타나 있다. 이러한 시스템을 이용하여 축방향 및 반경방향 릴리프(relief)를 갖는 단조품해석에 적용하였다. 그림10에서 볼 수 있듯이 축방향 릴리프의 효율성을 알 수 있으며, 스파이크 단조에 적용한 경우가 그림11에 있다. 복잡한 형상의 단조품을 해석하는데 3차원적인 계산은 많은 시간이 소모되어지므로 먼저 2차원적인 테스트를 한 다음 3차원 해석을 수행하게 된다. 항공기 부품인 터어빈 블레이드의 한 단면에 대한 2차원적인 계산 결과가 그림12에 보이고 있고, 날개 부위의 3차원

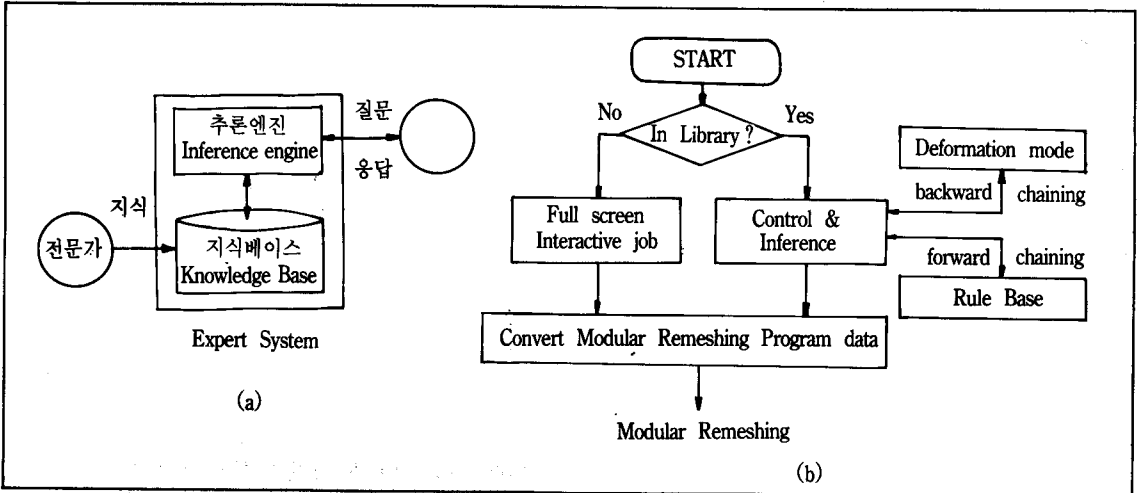


그림 9) 전문가 시스템의 개요(a)와 격자재구성에의 적용 (b)

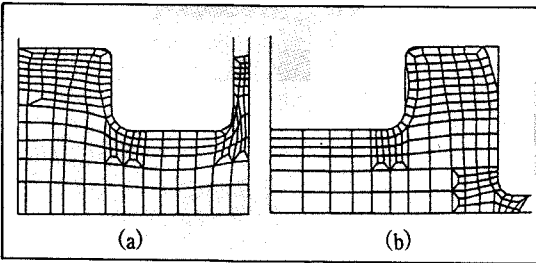


그림 10) 리브 웹 단조 (a) 축방향 릴리프 (b) 반경 방향 릴리프

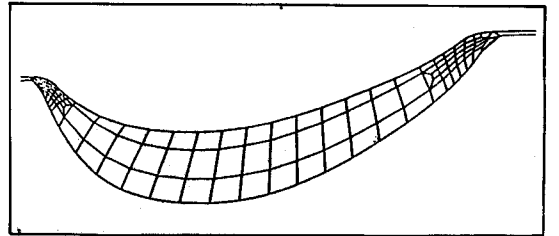


그림 12) 2차원의 블레이드 해석

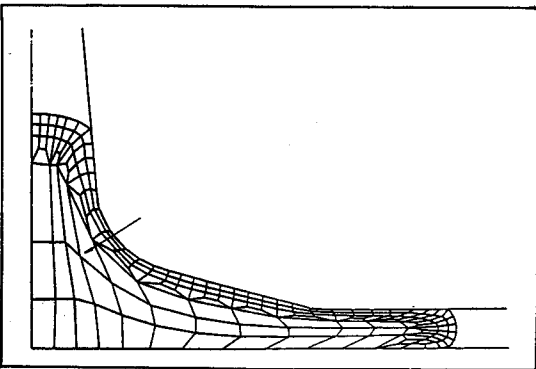


그림 11) spike단조에서의 격자형상

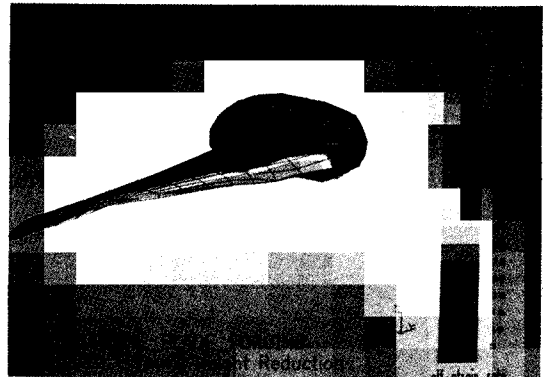


그림 13) 블레이드의 등온 3차원 해석

등온상태 해석에 의한 유효변형을 속도의 분포가 그림13에 보이고 있다. 실제 제품과 비교해 볼 때 거이 도입한 제품을 얻을 수 있다. 그림14에서는 소재의 절약 및 물성치의 향상을 위해서 절삭에

의한 기어가공 대신에 정밀한 형상에 가까운 정형(正形)의 평치차를 단조한 예를 보이고 있다[5]. 완제품에 가까운 정밀한 제품을 생산할 수 있도록 하기 위해서는 금형에 발생되는 응력집중 및 탄성 변형량을 계산하여 금형설계에 중요한 데이터를 제공할 수 있다. 특히 탄성 변형량은 정밀단조에

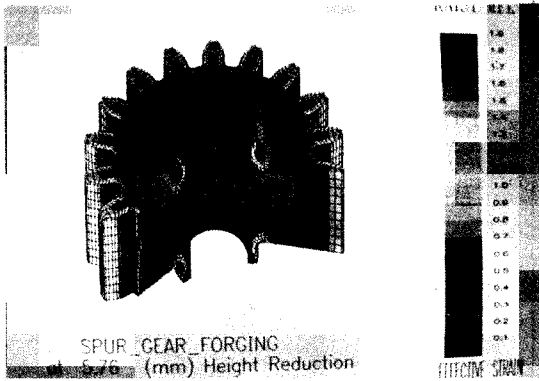


그림 14) 평치차의 정밀단조

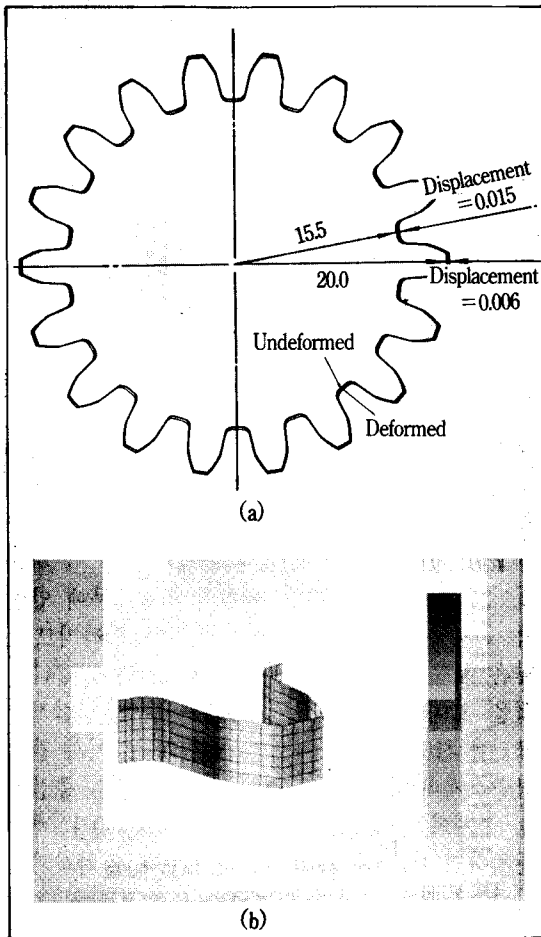


그림 15) 평치차 금형의 변형량(a)과 응력분포(b)

있어서 최종제품의 치수에 영향을 미치므로 금형설계에 중요한 고려사항이다. 평치차 금형의 한 치형에서 무차원화된 응력분포와 변형량을 나타낸

그림이 그림15이다[6].

4. 압출에서의 CAD/CAM/CAE

압출공정을 압출금형의 형상에 따라 분류하면 평금형 압출과 연속금형 압출로 나눌 수 있다. 평금형 압출은 Al이나 Cu등의 경금속을 주로 열간에서 원활없이 높은 단면. 감소율은 압출하는데 주로 사용된다. 연속적인 금형을 통한 원활된 소재의 냉간 압출방법은 제품의 치수가 정확하고 표면상태가 양호하며 재료의 강도와 제품의 기계적성질이 향상되는 장점이 있다. 냉간압출에 의한 가공법은 축대칭 형상의 봉재를 대량생산하는데 유효한 공정으로 알려져 왔으나, 요즘에는 점차 복잡한 형상의 3차원 압출에도 적용되고 있다.

평금형에 의한 압출의 경우에는 금형의 제작 과정은 쉬우나, 실제 설계를 위해서는 금형의 위치나 방향, 갯수등의 선정이 어렵다. 그 가장 큰 이유는 소정 역학적인 해석이 거의 이루어지지 않아, 금형설계를 대부분 실험적인 방법에 의존하고 있기 때문이다. 연속금형을 통한 압출의 경우에는 주로 해석적인 방법에 의해 임의 형상의 3차원 압출에까지 소성역학적 해석이 가능하므로 최적의 금형설계 및 제작에 이용할 수 있다. 평금형 압출에 대해서는 몇가지 실험적인 방법과 그 결과의 합리적인 정리에 의해 금형 CAD/CAM에 응용할 수 있는 방법 및 2차원의 해석을 소개하고, 연속금형에 대해서는 복잡한 3차원 압출금형의 수학적인 묘사방법과 나아가서는 소성역학적인

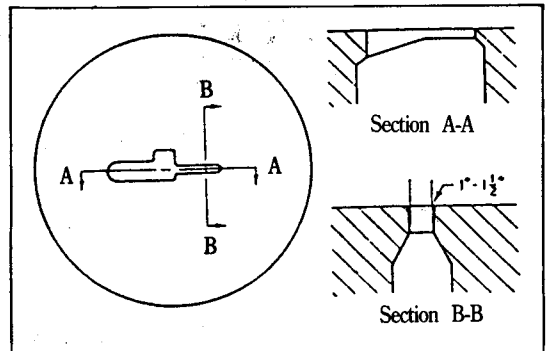


그림 16) 단면 두께와 랜드 길이의 변화

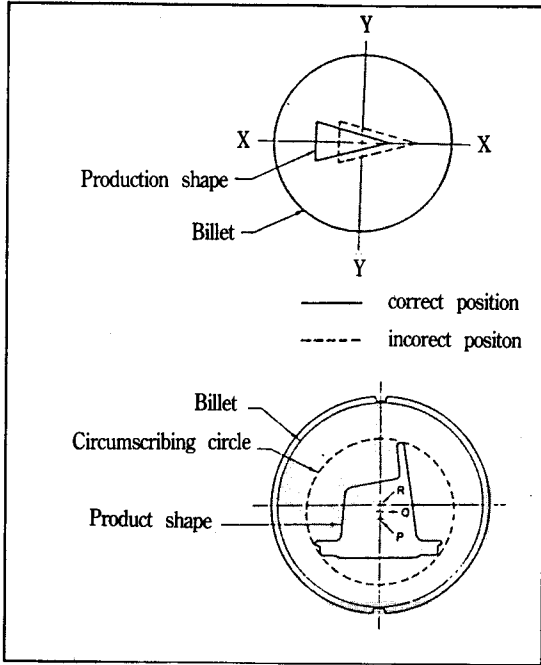


그림 17) 압출축에 대한 금형구멍의 위치선정

해석 및 유한요소해석을 통해 압출압력, 소성유동, 변형도 및 응력등을 예측하여 최적의 금형형상을 설계 제작하는 방법을 고찰하고자 한다.

4.1. 평금형 압출의 CAD/CAM

평금형 압출은 한 개 또는 여러 개의 구멍(orifice)이 있는 공구강의 평면으로 된 금형을 사용하는 압출방법이다. 그 금형구멍을 통해 주로 열간 상태의 재료를 원하는 형상으로 압출하게 된다. 평금형 압출의 금형설계를 위해서는 다음의 사항들을 결정해야 한다.

- (1) 금형구멍의 적절한 갯수
- (2) 균일한 유동을 위한 압출 축에 대한 금형구멍의 위치
- (3) 금형구멍의 방향
- (4) 열변형과 하중에 의한 변형을 고려한 금형구멍의 보정
- (5) 재료유동의 균형을 위한 랜드(land)부의 결정

이중에서 (5)는 아직도 현장에서의 많은 실험과 노하우(know-how)에 의존하고 있으며 많은 연

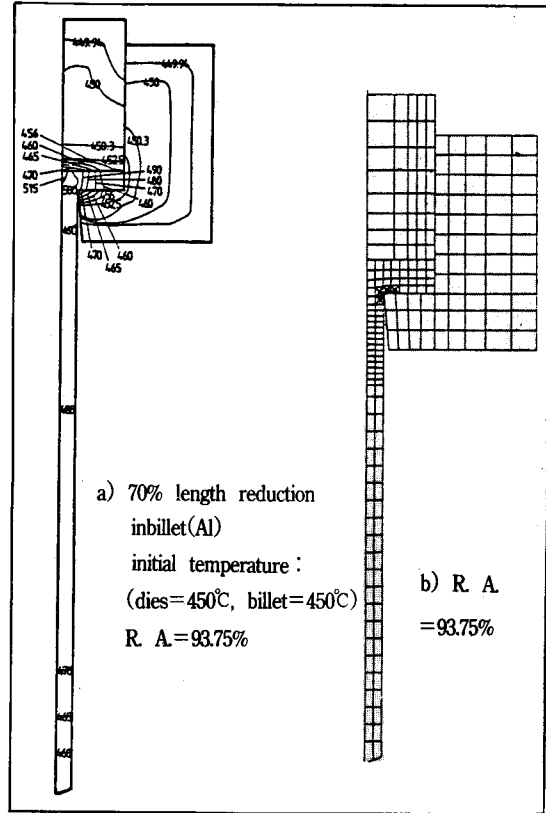


그림 18) 비정상 상태의 열간 축대칭 압출

구가 되어 있지 않으나 대단히 중요하다. 그림16에서와 같이 얇은 부분은 두꺼운 부분보다 랜드 길이를 짧게 하여야 하는데 실험에 의해 추진되는 랜드의 길이는 단면 두께의 1~2배 정도로 하는 것이다. 그림17(a)에서는 마찰의 영향때문에 압출축 근처에서의 유동은 벽면근처보다 빨라지므로, 얇은 부분은 압출축 근처에 이동시켜야 한다는 것을 보여준다. Perlin은 (2)에 관하여 실험적인 제안을 하였다. 그에 따르면 그림17(b)에서와 같이 압출소재의 중심을 R, 단면을 둘러싼 원의 중심을 Q, 무개의 중심을 P로 하였을 때 P, Q가 거의 일치하면 P, Q의 어느 한 쪽을 R과 일치시켜야 하나, P, Q가 떨어져 위치하면 Q는 R로 부터 P 쪽으로 떨어져 위치시켜야 한다. 이와 같은 지식들을 모아서 CAD/CAM으로 이용할 수 있도록 CAM프로그램인 ALEXR를 개발하였다. 그에 대한 내용을 간단히 살펴보면 다음과 같다. 여기에 사용되는 입력자료는 압출단면의 x, y 좌표인데 이로

부터 단면적, 원주, 형상계수(외주길이/중량/길이), 도심의 위치, 단면을 둘러싼 원의 크기 및 위치등을 계산하게 된다. 그 다음, 금형구멍의 갯수를 프레스용량, 최대압출길이, 재료의 이용도를 고려하여 결정하고, 적절한 소재크기를 결정하게 된다. 그 다음에는 금형구멍사이 및 금형구멍과 컨테이너(container)벽사이에 두어야 할 최소간격을 고려하고, 재료유동의 균형을 고려하여 금형구멍 위치를 선정하게 된다. 공기강도 해석으로 금형의 탄성변형을 고려하여 금형구멍의 위치 및 크기를 다시 조절하게 된다. 그 다음에는 금형랜드 길이를 결정한다. 이렇게 하여 결정된 금형치수를 전극봉의 NC가공에 사용하게 된다.

평금형 압출에 대한 소성역학적인 수치해석은 Euler-Lagrangian 방법의 도입이나 자동격자 재구성의 방법등을 이용한 수치해석으로 이루어지고 있다. 그림18은 코너부위에서 자동격자 재구성을 행하여 비정상상태의 열간 축대칭 문제를 해석한 예이다. 3차원 평금형 압출의 수치해석은 아직 이루어지지 않고 있으나 3차원에 대한 자동격자 재구성의 방법이 실현되어 진다면 가능하게 될 것이다.

4.2. 3차원 연속금형의 형상묘사 및 CAD/CAM/CAE

먼저 금형면의 형상을 수학적으로 묘사할 수 있어야 하는데, 복잡한 금형형상의 묘사 및 그에 따른 소성 역학적 해석을 하는 방법이 여러 학자에 의해 시도되고 있다.

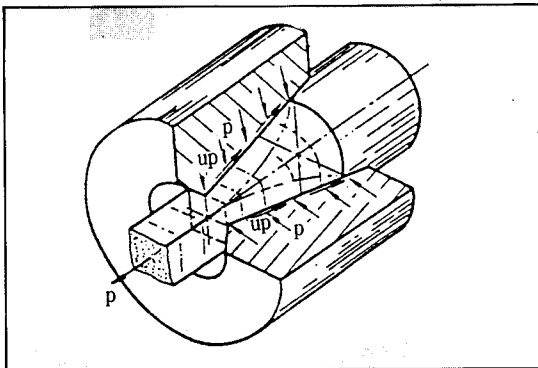


그림 19) 유사원추형 금형

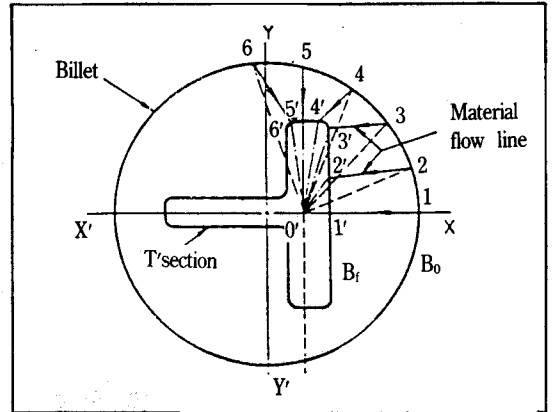


그림 20) 면적비에 대한 금형구성방법

4.2.1. 유사 원추형 금형(similar convex die)

그림19와 같은 형상의 유사 원추형 금형에 대해 1976년 Basily등[7]은 입출구 단면을 삼각형 요소로 나누어 수치적인 방법으로 금형면을 표시하고 이론 해석을 하였다. 각 삼각형 요소는 단면 감소율을 유지하면서, 출구단면은 쌍곡선 함수의 변이 되도록 해서 해석한 결과 마찰이 증가할수록 최적의 금형각이 증가함을 보여 주었다. 1979년 Boer등[8]은 원형단면에서 사각단면을 인발하는 경우에 대해 각단면의 형상을 다음과 같이 나타내어 금형면을 표현하였다.

$$\left(\frac{x_1}{K_a}\right)^n + \left(\frac{x_2}{K_b}\right)^n = 1$$

여기서, a 는 초기소재의 반경, K_a 는 0과 1사이의 파라미터(parameter), n 은 2(원형)에서 ∞ (사각형)까지의 파라미터를 나타낸다.

4.2.2. 선형 원추형 금형과 유선형 금형

단면감소율에 따른 면적비에 의해 금형형상을 결정하는 방법은 1977년 Nagpal등[9]에 의해 시작되었다. "T"형상의 압출에 적용한 경우를 예로 들면, 그림20의 o 는 "T"형 단면의 도심을 나타내고, 1, 2, ..., 6점은 1', 2', ..., 6' 점으로 단면감소율을 유지하면선 유동하는 것으로 하였다. 이렇게 구성된 금형형상에 대해 압출압력을 계산하고, 최소의 압출압력이 되는 금형형상을 결정하도록하는 컴퓨터 소프트웨어 패키지인 "SHAPE"를 개발하

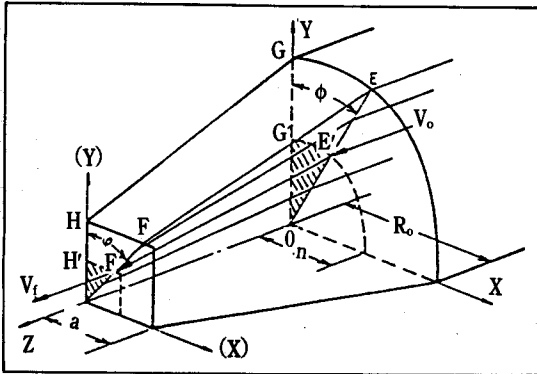


그림 21) 선형 원추형 금형

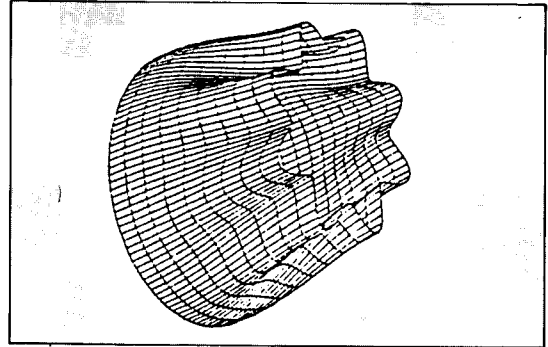


그림 23) NC공구 경로

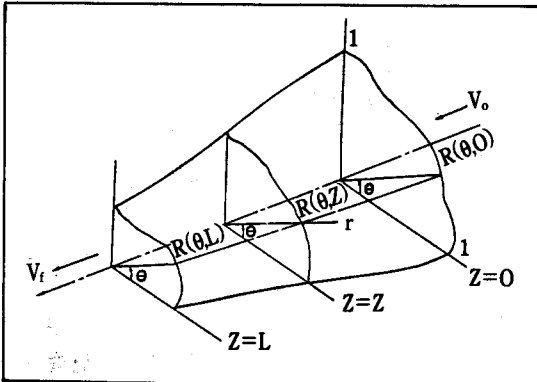


그림 22) 임의 형제에서 임의형제로의 압출

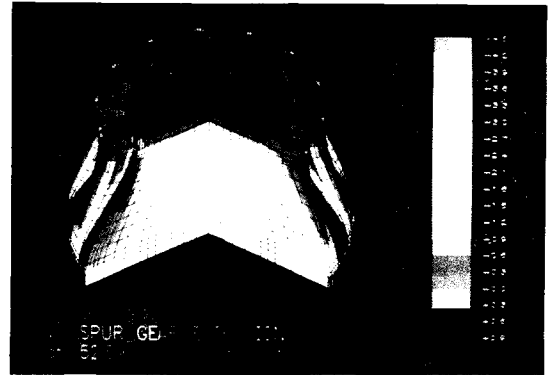


그림 24) 평치차 압출에서 평균 압축응력

였다. Gunasekera등[10]은 면적비에 의한 방법이 불가능한 단면에 대해서, 선적분으로 개선하여 "H" 형과 같은 형상의 금형을 제작할 수 있었다. 소성역학적 해석을 병행하기 위한 금형구성 방법 또한 여러학자들에 의해 제안되어 왔는데 그 중에서도, 1980년 Gunasekera등[11]은 그림21과 같은 선형원추형 금형에서의 유선의 점을 정의함으로써 압출압력을 구하고 최적의 금형형상을 결정할 수 있었다. 유선형 금형은 금형의 입·출구에서 전단이 일어나지 않고 압출되는 방향과 평행하게 유동하므로 선형원추형 금형보다 압력이 적게 걸리며, 변형이 균일하게 되는 장점이 있으나, 이론해석과 금형제작에서 어려운 점이 있다. 소성역학적 해석을 병행하기 위한 유선형 금형에 대한 금형 구성방법으로 원형에서 타원형 단면으로 압출하는 경우에 대해 dual stream function을 도입함으로써 해석하였다. Yang등[12]은 등각사상

(conformal transformation)을 이용하여 원형에서 임의의 형상으로 압출하는 3차원 금형의 금형면을 수식화하여 5축 NC밀링기에 의해 유선형 금형을 가공할 수 있었다. 1989년 Han등[13]은 그림22에서와 같이 금형의 입출구 단면을 축방향과 원주 각방향의 해석함수로 표시하여, 임의형상에서 임의형상으로 압출하는 경우를 유동 패턴 까지 예측할 수 있도록 하였다. 또한 단면 형상이 해석적으로 표현되지 않는 경우에는 Fourier전개에 의해 윤곽선의 해석함수로 나타냄으로써 임의형상의 압출금형에 대해 CAD/CAM을 적용할 수 있도록 하였다. 그림23은 이렇게하여 구한 trochoidal gear형에 대한 압출금형의 제작을 위한 전극봉의 절삭 가공 경로를 컴퓨터로 그린 것이다. 최근에는 가중잔류항법(method of weighted residuals)[13]및 유한요소법에 의하 수치해석 방법으로 압출공정을 해석하는 방법이 개발되어 왔는데, 이런 방법의 의하면 금형형상에 거의 제한 없이 해석이 가능

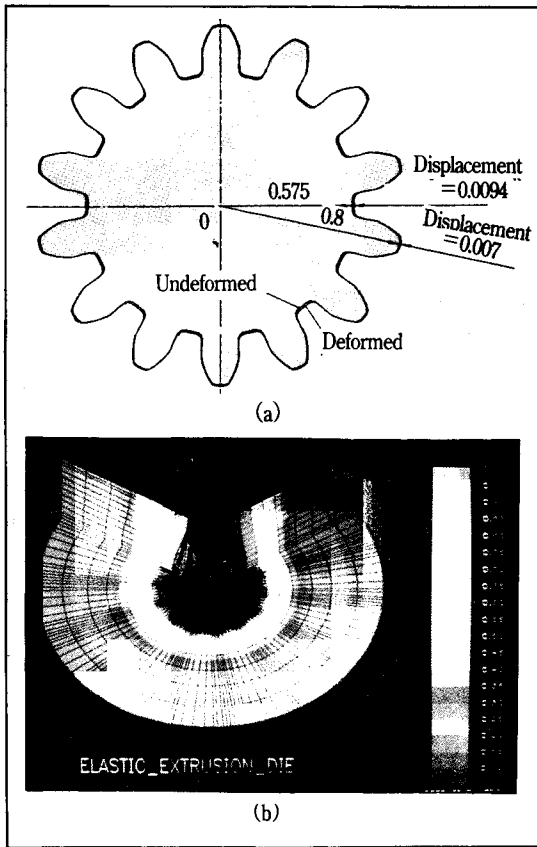


그림 25) 치차 압출금형의 탄성변형량(a)과 무차원화된 유효응력 분포(b)

하며 평균형 압출에도 적용이 가능한 장점이 있다. 그림24는 유한요소법에 의한 평치차 압출에서 평균 압출응력 분포를 보이고 있다[15]. 장축 단면에서 금형표면 가까이 인장응력이 작용하는데 이는 재료의 인장파괴가 일어날 수 있음을 알 수 있다. 또한, 소재의 응력분포로부터 금형의 탄성변형량과 온도분포를 계산할 수 있다. 그림25는 치차압출을 위한 금형의 탄성 변형량 및 무차원화된 유효응력의 분포를 나타낸 것이다. 이러한 CAE의 결과들로부터 금형의 설계 및 공정의 개발, 개선을 이룰 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

3차원 금형의 CAD/CAM에 대한 제 방법을 비교 검토하였으며 특히 CAD/CAM에 의한 설계된 금

형면의 가공방법 및 금형의 CAD/CAM과 공정의 개선, 개발에 중요한 공학적 정보를 제공하는 bulk성형에서 CAE에 대해서 서술 하였다.

CAD/CAM은 소성가공 분야에 계속적으로 적용되어 오고 있다. 최종 부품형상이나 컴퓨터에서 설계된 형상의 3차원 묘사를 이용하여 그에 관련된 부품의 형상을 설계할 수 있다. 이를 위하여, 기하학적인 처리, 제도 및 NC가공을 위한 CAD/CAM시스템을 사용하는 것이 좋다. 유한 요소법 등을 이용하여 시뮬레이션함으로써 성형하중과 변형유동을 예측할 수 있으므로 초기형상과 중간형상을 설계할 수 있다. 이렇게하여 중간단계와 최종단계의 형상이 설계자에게 만족할만하면 이러한 기하학적 데이터 베이스를 이용하여 NC데이터를 얻어 프로그래밍이 가능하다. 이러한 CAD/CAM과정과 관련된 CAE의 적용이 중요하다. bulk성형에 있어서 컴퓨터에 의한 공학적 해석의 발달은 컴퓨터 처리속도와 기억용량의 발전과 함께 발전되어져 가고 있다. 특히 유한 요소법에서는 3차원 계산의 수행을 완전 자동으로 할 수 있는 격자 재구성법의 개발이 절실히 요구되어진다. CAD/CAM과정과 관련된 향후 연구는 (1) 복잡한 3차원 부품에 대한 기하학적 처리의 자동화 (2) 경험적 요소와 시뮬레이션 결과를 종합하는 전문가 시스템(expert system) 개발의 방향에서 연구가 더욱 진행되어져야 한다.

참 고 문 헌

- [1] J. H. Yoon and D. Y. Yang, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Three-Dimensional Forging by Considering Friction on Continuous Curved Dies with Initial guess Generation", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 30, 887-898, 1988.
- [2] 한국과학기술원, 자유단조시 불량감소를 위한 공정해석 및 개선에 관한 연구, 한국중공업(주), 1991.
- [3] 최병규, 정형가공의 CAD/CAM 및 Expert System화에 관한 연구: 정형가공을 위한 금형제작의 CAD/CAM 및 CAPP화, 목적기초연구 제2차년도 중간보고서, 제 8 세부과제, 1991.

- [4] J. H. Yoon and D. Y. Yang, "A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using a Remeshing Technique", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 32, 277-291, 1990.
- [5] D. Y. Yang, N. K. Lee and J. H. Yoon, "A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Spur Gear Forging Using the Modular Remeshing Technique", *Proc. Instn. Mesh. Engrs. Part B J. Engng Manufacture*, Vol. 205, 111-121, 1991.
- [6] 한국과학기술원, 정밀 냉간단조를 위한 금형 및 가공공정 설계기술에 대한 연구(III), 한국과학기술재단, 1991.
- [7] B. B. Basily and D. H. Sansome, "Some Theoretical Considerations for the Direct Drawing of Section Rod from Round Bar", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, 201-208, 1976.
- [8] C. R. Boer et al., "An Upper-Bound Approach for the Direct Drawing of Square Section Rod from Round Bar", *20th Int. Mach. Tool Des. Res. Conf.*, 149-156, 1979.
- [9] V. Nagpal, C. f. Billhardt and T. Altan, "Lubricated Extrusion of T Sections from Aluminum, Titanium and Steel Computer-Aided Techniques", *Trans ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 101, 319-325, 1975.
- [10] J. S. Gunasekera and S. Hoshino, "Extrusion of Non-Circular Sections through Shaped Dies", *Annals of the CIRP*, 141-145, 1980.
- [11] J. S. Gunasekera et al., "CAD/CAM of Die : Computer Modelling and Graphics make Complex Metalworking Dies Easier to Realize", *Computers in Mechanical Eng.*, 58-62, 1982.
- [12] D. Y. Yang and C. H. Lee, "Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Sections through Curved Dies by Conformal Transformation", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 20, 229-233, 1985.
- [13] D. Y. Yang, C. H. Han and M. U. Kim, "A Generalized Method for Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Arbitrarily-Shaped Sections", *Int. J. of Mech. Sci.*, Vol. 28, No. 8, 518-534, 1986.
- [14] C. M. Lee, D. Y. Yang and K. Lange, "Numerical Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Elliptic Sections by the A method of Weighted Residuals", *Int. J. of Mech. Sci.*, Vol. 31, No. 5, 379-393, 1989.
- [15] D. Y. Yang, J. H. Yoon and C. M. Lee, "Computer-Aided Numerical Analysis and Design for Cold Extrusion of a Spur Gear", *Proc. Instn. Mesh. Engrs. Part B J. Engng Manufacture*, Vol. 204, 203-209, 1990.