

## 자동 단위체 격자재구성법을 이용한 열간 평금형압출의 3차원 유한요소해석

강 연 식\*, 양 동 열  
한국과학기술원 정밀공학과

### A Three-Dimensional Finite Element Analysis of Hot Extrusion through Square Dies by automatic remeshing Technique with modular concept

Y.S.Kang, D.Y.Yang

Dept. of Precision Engineering & Mechatronics, KAIST

#### ABSTRACT

An updated Lagrangian finite element analysis with automatic remeshing scheme is applied to the three-dimensional hot extrusion through landless square dies. In the remeshing procedure, it is very difficult that the meshes are generated automatically with consideration of physical characteristics. In the presented study, the mesh generation is accomplished by modular concept. The generated meshes by modular concept have advantages, especially for three-dimensional problems, such as economized computational time and consideration of physical characteristic. In the problem, orifice shapes of square die are divided into two for the extrusion of solid sections. The orifice adaptive modules are developed for each type and the numerical examples are carried out for each type.

**Key Words :** Extrusion through Square Dies , Modular Concept , Automatic Remeshing

#### 1. 서론

금속성형의 유한요소해석에 있어서 updated Lagrangian 접근방식은 비정상상태의 해석을 하는데 광범위하게 이용되어져 왔다. 대부분의 문제에 있어서 효과적으로 사용되어왔으나 평금형과 같이 급격한 유동의 변화가 있는 경우 해석에 곤란함을 겪어 왔다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 여러가지 방법이 제안되어 왔다[1-4]. 이들중에서 자동격자 재구성법이 updated Lagrangian 접근방식에 적합하며 가장 널리 이용되어져 왔다.

평금형 압출은 형상 단면재의 제조에 널리 이용되는 공정으로 최근에 들어서 복잡한 형상에 대한 요구가 늘고 있다. 따라서 평금형 압출 공정의 제어와 기계적성질의 예측이 더욱 중요하게 되었다. 대부분의 평금형 압출은 3차원 문제이고 열간 압출은 비정상상태의 성질이 강하므로 3차원 비정상상태의 해석이 요구되어진다. 평금형 압출의 해석시에

금형의 오리피스(orifice) 부근에서 급격한 유동변화때문에 해석에 어려움을 갖게된다. 따라서 극히 적은 수의 3차원 해석만이 이뤄졌다. 본 연구에서는 자동격자재구성법을 적용한 updated Lagrangian 유한요소법으로 3차원 평균형 열간압출을 해석하고자 한다. 자동격자 재구성법에서 가장 중요한 것중의 하나가 격자를 어떻게 생성하는가이다. 지금까지 개발된 자동 격자 생성법으로는 격자재구성단계에서 물리적 특성과 계산의 효율성을 고려해주기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 단위체 개념을 이요한 격자생성법을 사용하였다. 단위체 개념을 이용한 격자 생성법은 해석하고자 하는 문제가 대칭축이 여러개 있거나 기하학적으로 2차원 단면 특성이 있는 경우 효과적으로 적용할 수 있는데 평균형 압출의 경우 압출방향과 수직인 단면들로 형상이 묘사 될수 있으므로 효과적으로 적용 할 수 있다.

본 연구에서는 속이 찬 3차원 형상재의 평균형 압출에 대한 해석을 단위체 개념을 도입하여 수행하였다. 오리피스 형상에 따라 i) 오리피스 형상에 날카로운 꺾임부가 있는 경우와 ii) 오리피스 형상이 연속적으로 이뤄진 경우로 구분하여 해석을 하였다.

## 2. 이론

### 2.1 변형해석

본 논문에서 변형해석은 강-점소성 수식화에 근거를 둔다.  $\delta v_i$ 를 경계 조건에 합치하는 속도장에 대한 임의의 변분량이라고 하면 변형해석을 위한 변분식은 다음과 같다[5].

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K^* \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

이때,  $\bar{\sigma}$ 와  $\dot{\epsilon}$ 는 각각 유효응력과 유효변형율속도이다.  $K^*$ 는 비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙상수이고  $f$ 는 마찰 경계 조건이다.

### 2.2 온도 해석

등방성 재료에 대한 에너지 평형 방정식(energy balance equation)을 가중잔류항법에 의해 정리[6]하면 다음과 같다.

$$\int_V k T_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c T \delta T dV - \int_V k^* \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \quad (2)$$

식(3)를 유한차분 근사화[6]하여 온도장을 구한다.

### 3. 압출을 위한 자동격자 재구성 방법

#### 3.1 자동격자 재구성 과정

평균형을 통한 전방압출의 해석에서는 격자재구성이 자주 요구된다. 격자재구성은 일반적으로 시간이 많이 소요되며, 지루한 작업과 실수에 의한 오차를 일으킬 수 있기 때문에 자동격자 재구성방법을 사용한다.

자동 격자 재구성에 대한 흐름도를 그림 1에 나타냈다. 격자재구성의 첫 단계이자 중요한 단계중의 하나가 격자재구성이 필요한가를 판별하는 것이다. 본 논문에서 사용한 8절점 육면체 요소에 대한 격자재구성 판별조건[7]은 다음과 같다.

- i) 격자 간섭 조건
- ii) 격자 찌그러짐 조건
- iii) 격자 꼬아짐 조건

일반적으로 격자 꼬아짐 조건을 기준 ii)로 포함시킬수 있으나 평균형 압출의 경우는 격자가 기준 b)를 만족하지 않고 곧바로 꼬아지는 경우가 발생할 수 있으므로 기준 iii)을 고려 하였다. 격자 재구성 판별조건에 따라 격자재구성이 필요하면 그림 1과 같은 격자재구성 과정을 거치게 된다. 이때 구격자에서 새로운 격자로 전달되는 변수는 유효변형률, 온도와 열유량이다.

#### 3.2 단위체 개념을 이용한 격자의 생성

초기 격자와 격자재구성 단계에서 격자의 설계와 생성은 유한 요소 해석에 있어서 매우 중요하다. 본 연구에서는 단위체 개념[7]을 이용하여 격자를 생성하였다. 이 방법은 계산의 효율성과 유동, 기하학적 특성을 고려해줄 수 있으며 본 연구의 문제와 같이 기하학적으로 단면특성이 있는 문제에 더욱 효율적이다.

전체 격자를 모듈 이라고 부르는 단위 영역들의 조합으로 구성될 수 있다. 각 모듈은 각각 독립적으로 생성되고 각각의 모듈들은 기하학적 라이브러리(library)로 사용된다. 기하학적으로 차이가 있더라도 Topology가 유사하면 같은 모듈로 취급된다. 설계단계에서 라이브러리화된 모듈을 적절하게 선정하고 유동과 기하학적 특성에 맞게 배열한다. 격자 재구성단계에서는 설계단계에서 결정한 모듈정보를 가지고 새로운 격자를 생성하게 한다. 본 논문에서 사용한 기본모듈을 그림 2에 나타냈다. 그림 2(a)는 규칙적 모듈로써 가장 널

리 사용되어진다. 그림 2(b-d)는 천이 모듈이다. 이러한 모듈로써 계산의 효율성을 달성할 수 있다. 설계된 소재의 격자는 이러한 모듈의 결합으로 국부적으로 세분화시킬 수 있다. 그림 3과 4에는 평균형 압출을 해석할 수 있도록 오리피스에 유동을 고려하여 설계된 모듈로써 오리피스 모듈이라 한다. 오리피스 모듈들은 그림 2의 기본 모듈들을 조합하여 구성하였다. 그림 3은 오리피스의 형상이 날카로운 꺾임을 포함하는 경우에 적합한 오리피스 모듈이고 그림 4는 오리피스의 형상이 연속적인 형상으로 이뤄진 경우에 적합한 모듈이다. 그림 3과 4에서 주모듈(main module)은 오리피스 주위에서 격자들이 세분화될 수 있도록 금형과 접하게 위치시킨다. 윗모듈(upper module)과 아랫 모듈(lower module)은 주모듈과 규칙적인 모듈과의 연결을 위한 모듈이다. 격자 생성은 오리피스 모듈들이 생성된 다음 반지름 안과 밖의 방향으로 규칙모듈들이 transfinite 사상 개념을 이용하여 생성된다. 그 다음에 펀치 부근과 압출된 소재부의 규칙모듈들이 생성되어 오리피스모듈에 연결된다. 요소 연결(element connection)을 각 모듈안에서 국부적으로 수행한 다음에 절점의 전체적인 절점의 번호 붙이기(global numbering)는 밴드폭(band width)이 감소되는 방향으로 이루어진다.

#### 4. 수치 해석

본 해석에서는 온도해석과 변형해석 모두를 비정상 상태 유한요소해석을 하였다. 3차원 해석의 경우 계산시간이 많이 소요되므로 계산시간을 줄이기 위해서 변형해석과 온도 해석을 완전히 비연계 시켜 해석하였다. 계산에 사용된 소재와 금형의 재료는 각각 Al-1100 와 H13이다. 소재의 유동응력식[8]은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = C(T)(\dot{\epsilon})^{m(T)} \quad (3)$$

C와 m은 Table 1의 값들을 이용하여 계산하였다.

마찰 상수는 0.3이고 펀치의 속도는 10 mm/sec로 택하였다. 소재와 금형의 초기온도는 450 °C, 420 °C 이고 주변온도는 17 °C이다. Table 2에는 계산에 사용된 열적특성과 열전달 계수를 나타냈다.

#### 5. 결과 및 검토

단위체 개념을 이용한 자동격자 재구성법으로 평균형 열간 압출을 해석하기 위하여 계산을 수행하였다. 속이 찬 형태의 압출의 경우, 오리피스 형태에 따라 두가지 형태로 분류하여 유한요소 해석을 하였다.

### 오리피스 형상에 날카로운 꺾임이 있는 경우

첫번째 예제로 십자형 단면재의 압출을 해석하였다. 대칭성을 고려하여 1/4만을 계산하였다. 그림 5 에는 계산에 사용되는 격자를 나타내었다. 격자점의 45% 이상이 오리피스 부근에 배치되었다. 1/4 단면에서 오리피스 형상이 3개의 꺾임을 갖고 있다. 이경우는 그림 5(b)와 같이 2개의 오리피스 모듈을 설치하여 격자를 구성하였다. 그림 5(b)는 오리피스 바로 위에서 격자의 단면 형상을 나타낸 것이다. 4.25mm핀치 이동까지 계산을 수행하였는데 10번의 격자재구성이 요구되었다. 그림 6과 7에는 소재의 유효변형률속도 와 온도 분포를 나타내었다. 단면감소율이 가장 큰곳에서 유효변형률 속도가 가장크게 나타났다. 본 연구에서는 랜드부를 고려하지 않았기 때문에 오리피스의 속도는 소재의 중심부로부터의 거리에 따른다. 따라서 이점에서 속도의 변화가 가장크기 때문에 유효변형률 속도가 크게 나타났다. 그림 7에서 보면 온도가 낮은 두 영역이 존재하는데 이 부근에서 금형으로 열 방출이 크고 변형에 의한 열발생이 작기때문이다. 그림 8에는 금형의 온도 분포를 나타냈다. 오리피스 부근에서 온도분포가 높음을 볼 수 있는데 이것은 마찰열에 의한 것이다.

### 연속적인 오리피스 형상을 갖는 경우

연속적인 오리피스 형상을 갖는 압출에 대한 예제로써 타원형재와 트로코이달 기어 형재의 압출을 해석하였다. 대칭성을 고려하여 각각 1/4과 1/16을 계산 하였다. 두가지 예제의 경우 핀치이동이 3.8mm일때 까지 계산을 수행하였다. 각각 9번의 격자재구성이 수행되었다. 연속적인 형상을 갖는 경우 그림 4의 오리피스 모듈의 A점을 오리피스에 따라 배열시켰다. 그림 9에는 타원형재 압출의 경우 오리피스 모듈을 오리피스 형상에 따라 배열시킨 그림이다. 그림 10에는 타원 형재의 압출에 사용된 격자이다. 그림 11에는 유효변형률분포를 나타냈다. 컨테이너와 접하는 곳에서 유효변형률 분포가 중간에서 약간 높게 나타난것을 볼 수 있는데 이는 비유동영역을 미끌어지는 전단변형률때문이다. 그림 12에는 트로코이달기어 형재의 압출에 사용된 격자구조이다. 그림 13에는 유효변형률 분포를 나타냈다. 오리피스 바로위의 단면에서 유효변형률분포를 보면은 그림 13(b)와 같이 장축과 단축사이에서 가장높게 나타남을 볼 수 있는데 이유는 그림 13(c,d)에서 보는 것과 같이 전단변형률 성분이 이부분에서 크기 때문이다. 이러한 현상은 타원형재의 압출에서도 나타난다. 그림 14에는 트로코이달기어 형재의 압출에 있어서 온도분포를 나타냈다.

격자점의 분포는 타원형재의 경우 65% 그리고 트로코이달기어형재의 경우 67% 이상이 오리피스 부근에 배열되게 하였다.

## 6. 결론

자동격자 재구성법을 이용한 3차원 유한 요소법으로 랜드부가 없는 평금형 열간 압출

을 해석하였다. 자동격자 재구성법에서 격자 생성은 단위체 개념을 이용하였다. 단위체 개념을 이용한 격자 생성법은 전문가 적이기 는 하지만 이 방법으로 계산의 효율과 물리적 특성을 고려해 줄 수 있었다. 특히 평금형 압출은 기하학적 특성이 2차원 탄면으로 쉽게 나타낼 수 있기 때문에 보다 효과적으로 사용될 수 있었다. 단위체 개념을 이용하여 변형이 주로 이뤄지는 오리피스 부근에 격자점을 45-67% 이상을 위치시킬 수 있었다. 이것은 단위체 격자 생성법이 효과적으로 사용되었음을 나타낸다.

본 연구에서는 속이찬 형태의 압출을 경우 오리피스 형상을 2가지 분류하여 각각에 해당하는 오리피스 모듈을 개발하여 적용하여 보았다. 보다 복잡한 경우의 단면형상의 압출 재도 2가지 오리피스 모듈을 적절하게 조합함으로써 계산될 수 있다. 3가지 예제에 대해 계산을 수행한 결과 온도와 유효변형을 속오의 분포가 합리적으로 해석되어 졌다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법이 평금형 열간 압출의 해석에 효과적으로 수행될 수 있음을 알 수 있다.

후기: 본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. K. Mori, K. Osakada and M. Fukuda, Int. J. Mech. Sci., Vol. 25 (1983), pp. 775-783
2. S. Tanaka, K. Sato and F. Uchida, Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 26 (1985), pp. 87-93
3. J.H. Cheng, Int. J. Num. Meth. in Eng., Vol. 26 (1988), pp. 1-18
4. S. Ghosh, J. Mater. Shaping Technol., Vol. 8 (1990), pp. 53-64
5. J.H. Yoon and D.Y. Yang, Int.J. of Mech. Sci., Vol. 30 (1988), pp. 887-898
6. 박치용, 조종래, 양동열, 대한기계학회 논문집, Vol. 14 (1990), pp. 1166-1180
7. J.H. Yoon and D.Y. Yang, Int. J. Mech. Sci., Vol.32 (1990), pp. 277-291
8. T. Altan, S.I. Oh and H.L. Gegel, Metal Forming: Fundamentals and Applications, Americal Soc. for Metals, (1983), chap.4

$$\bar{\sigma} = c(\dot{\epsilon})^n$$

temperature	c (N/mm <sup>2</sup> )	n
200 °C	84.18	0.075
400 °C	31.05	0.141
500 °C	14.49	0.224

Table 1. Stress-strain rate properties of Al-1100 given with respect to the temperature

Coeff	k	$\rho c$	$h/h_{lub}$	$\epsilon$
	N/(sec·°C)	N/(mm <sup>2</sup> ·°C)	N/(sec·mm·°C)	
DIE and Punch	28.4	3.9	0.0033 /35.02	0.6
W.P. (Al-1100)	242.148	2.427		

Table 2. Thermal properties and heat transfer coefficients

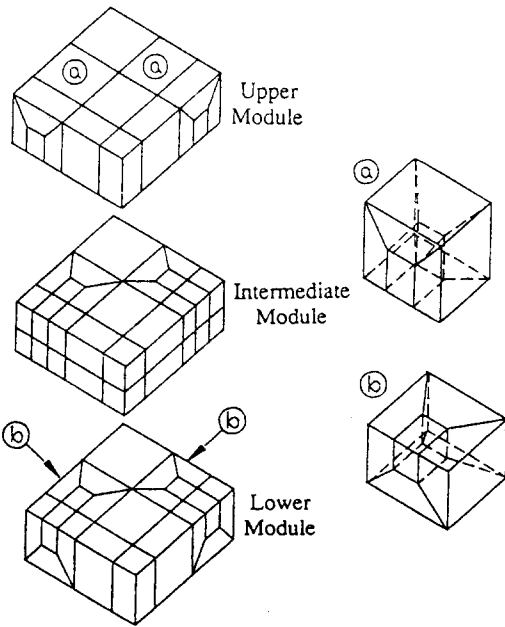
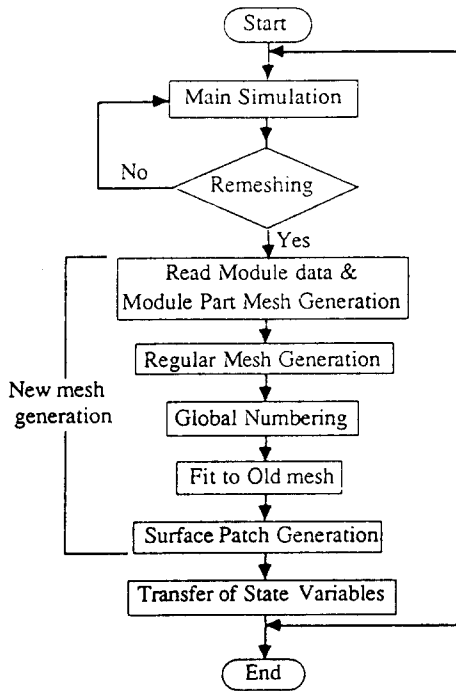


Figure 3 Mesh configuration of orifice adaptive module (I)

Figure 1 Flow chart for automatic remeshing

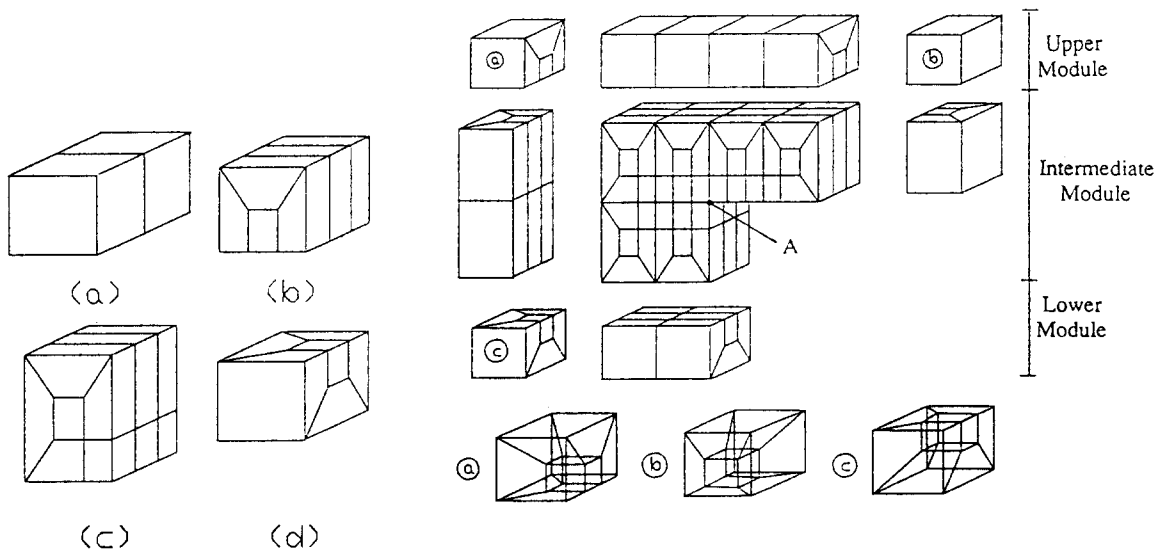


Figure 4 Mesh configuration of orifice adaptive module (II)

Figure 2 Selected basic modules for the analysis

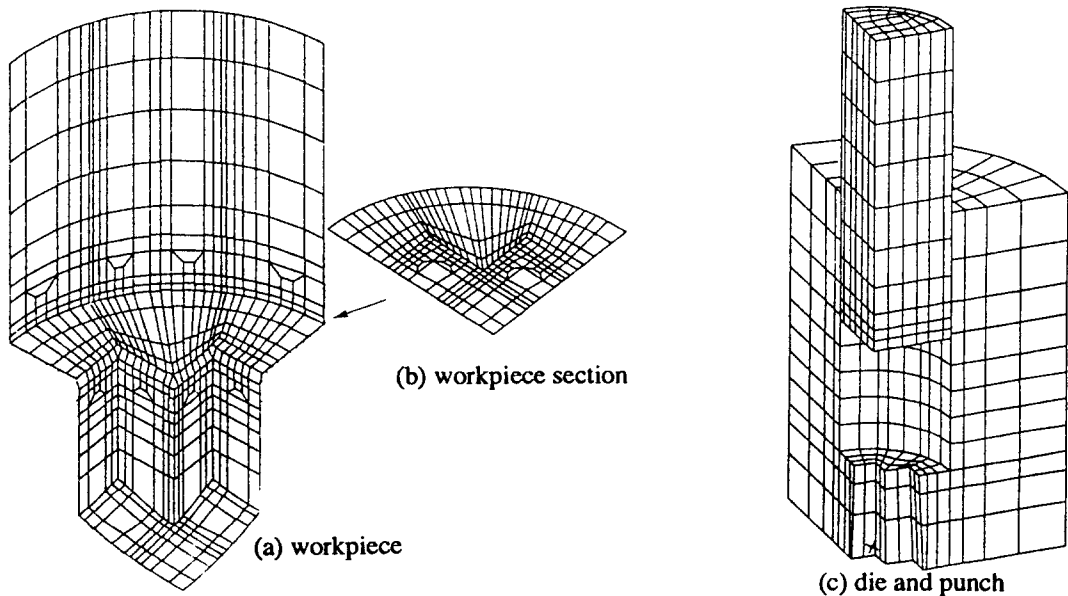


Figure 5 Mesh system for extrusion of cross section

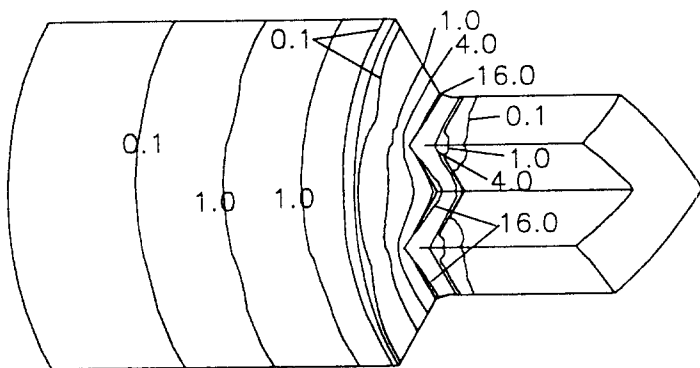


Figure 6 Distribution of effective strain rate for extrusion of cross section at the punch travel of 4.25mm

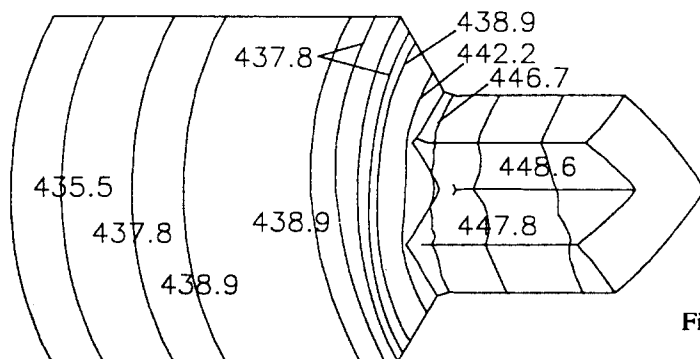


Figure 7 Distribution of temperature for extrusion of cross section at the punch travel of 4.25mm

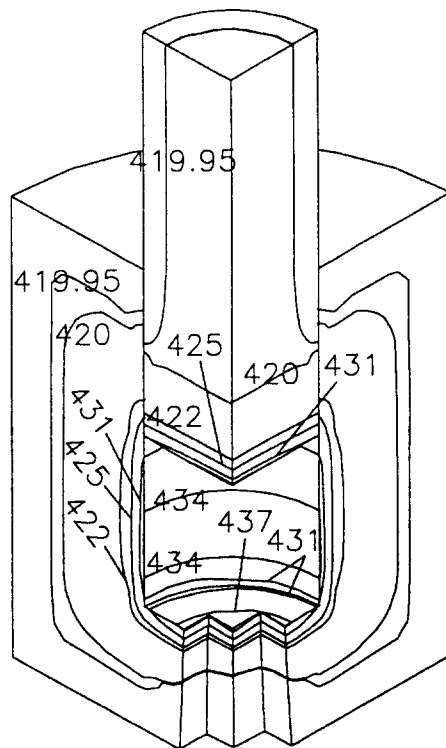


Figure 8 Temperature distribution of die and punch for extrusion of cross section



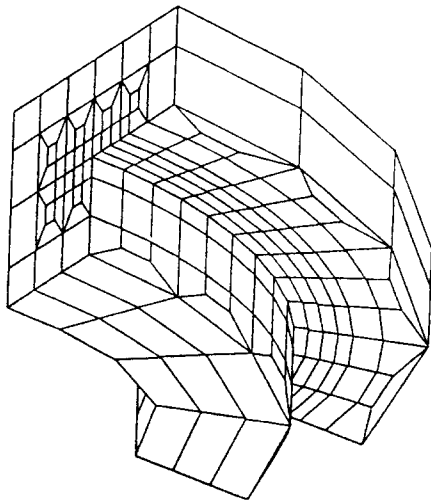


Figure 9 Construction of orifice adaptive module part for extrusion of elliptic section

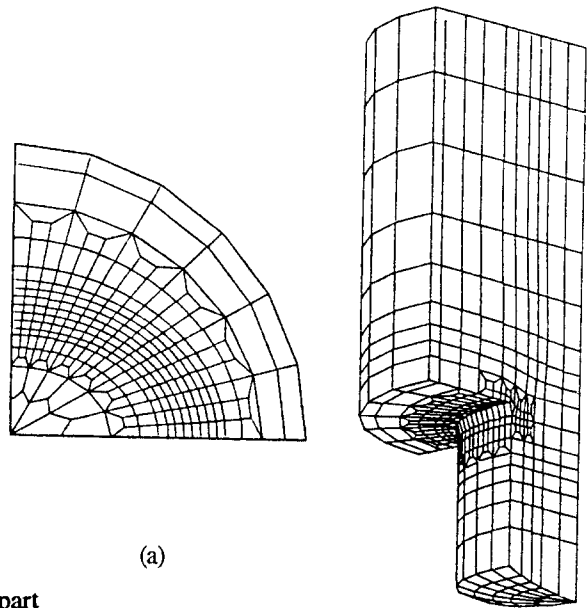


Figure 10 Mesh system for extrusion of elliptic section

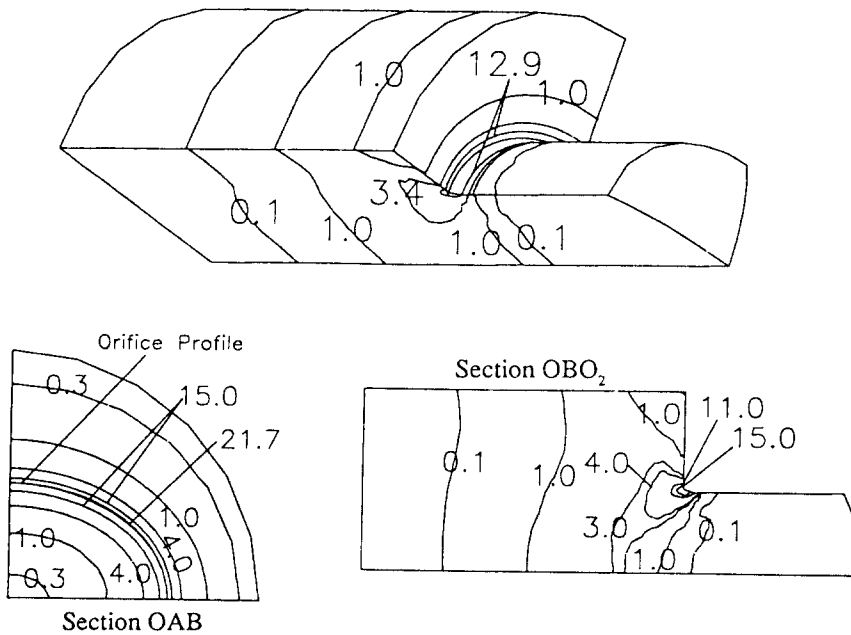


Figure 11 Distribution of effective strain rate for extrusion of elliptic section at the punch travel of 3.74mm

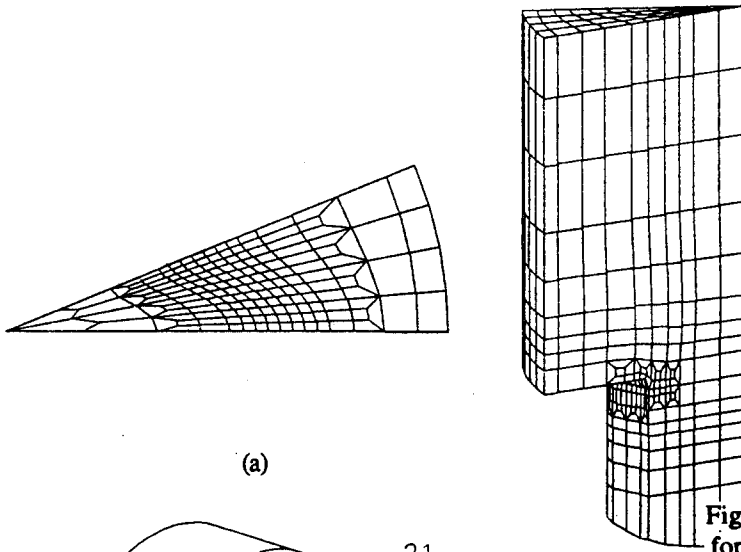


Figure 12 Mesh system for extrusion of trochoidal gear section

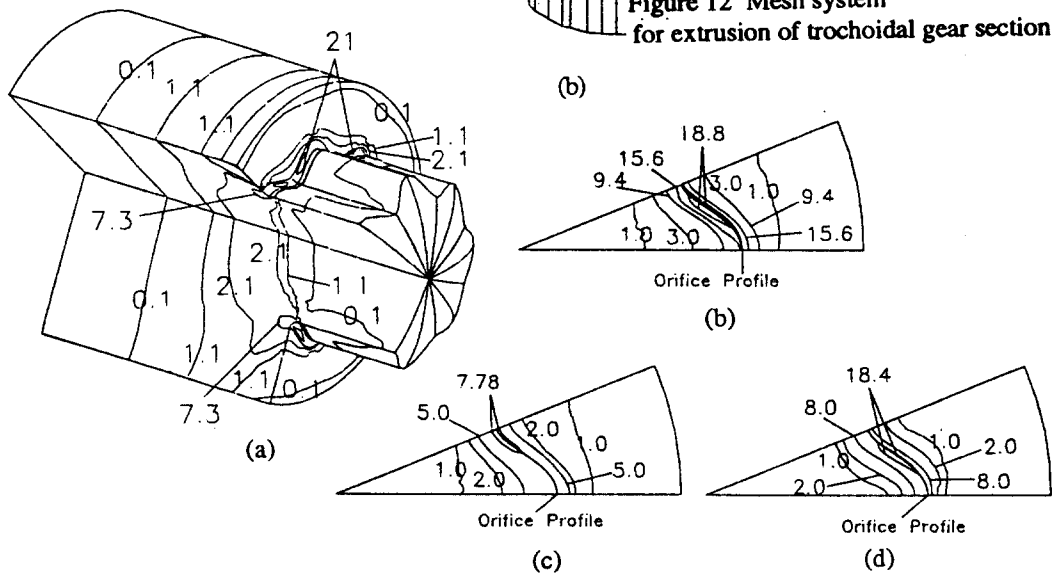


Figure 13 Distribution of effective strain rate for extrusion of trochoidal gear section at the punch travel of 3.89mm

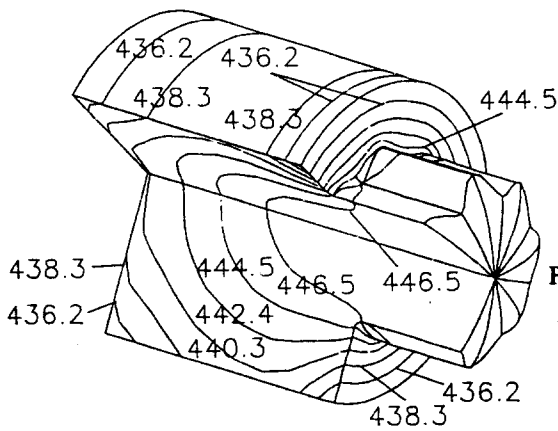


Figure 14 Distribution of temperature for extrusion of trochoidal gear section at the punch travel of 3.89mm