

초내열합금 벨브의 성형공정 설계 및 미세조직 분석

강 범 수*, 최 민 식**, 배 진 영***, 박 노 광****

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소, ** 부산대학교 항공우주공학과 대학원
*** 삼성항공, **** 한국기계연구원

Process Design in Forging of Ultra-Heat Resisting Alloy and Analysis of Micro-Structure

Beom-Soo Kang*, Min-Shik Choi**, Jin-Young Bae***, Rho-Kwang Park****

* ERC/NSDM, Pusan National University, ** Pusan National University
*** SAMSUNG AeroSpace, **** KIMM

Abstract

A preform for engine valve was designed by finite element method. In the preform design of engine valve, various initial billets are simulated for better preform to get sound final product. Here a preform is design to get desirable metal flow in the forming so that the final product has more uniform strain distribution after forming. The analysis of the micro-structure of the value formed through the designed process was also performed and result was compared with that of simulation.

1. 서론

소성가공은 초기소재에서 재료의 제거없이 변형을 통해 형상과 소재의 성질을 변화시키는 작업으로 소성가공 중에 소재의 기계적 성질이 향상되며 정형이나 정형에 가까운 제품을 만들 수 있고 성형속도가 빠르므로 경제적이라는 장점을 가지고 있다[1].

소성가공공정의 해석에는 해석적 방법, 실험적 방법, 수치해석적 방법의 세 가지 접근방법이 있다. 해석적 방법은 복잡한 부품의 성형공정에 대해서는 소재의 유동, 변형률분포 등과 같은 자세한 정보를 구하기 어렵고[2,3], 물리적 모델링법[4]과 기하학적 유사성을 가진 다른 크기의 소재로 모델링하는 실험적방법은 소성변형의 이론에 대한 전문적 지식이 요구되지 않고 유용한 정보를 제공하므로 현장에서 많이 쓰여 왔으나 시물레이션 조건을 제어하기가 어렵고 최종 시편의 변형정도의 측정에 한계가 있다.

이에 컴퓨터의 발달과 더불어 다른 방법에 비해 적용범위가 넓고 다양하며 복잡한 형상에 대해서도 자세한 소재 유동정보를 제시해 주는 유한요소법이 가장 널리 쓰이고 있으며 이에대한 연구의 중요성이 부각되고 있다.[5]

이와 아울러서 소성가공공정 설계시 고려되어야 할 것은 재료내의 미세조직에 관한 분석이다. 가장 일반적인 소성가공인 단조공정을 해석할 경우 큰 변형률이 수반되고, 복잡한 형상의 제품을 단조할 경우 부위별로 변형률, 변형률속도, 온도, 기타 변형이력이 달라지게 된다. 특히 니켈합금의 성형과 같이 고온(1000°C-1200°C)에서 수행되는 온간단조의 경우 단조재 내부의 변형이력이 달라지게 되고, 변형중 유동응력은 변형속도에 따라 심하게 변하게 되므로 이에 관한 조사가 이루어져야 한다.

본연구에서는 유한요소법을 이용하여 디젤 엔진기관 벨브의 공정설계와 미세조직에 대한 분석을 수행하였다. 해석시 사용될 재료는 고온에서 내식성과 기계적 특성이 우수하여 고온용 기계부품에 많이 사용되고 있는 Nimonic 80A이다. 적절한 예비성형체를 설계하기 위해 좌굴한계이상의 반경을 가지는 여러 가지 크기의 원통형 초기소재를 시물레이션하여 소재유동이 적절한 소재의 반경을 찾아 예비성형체 성형시의 초기소재로 사용하였다. 이렇게 만들어진 초기소재의 시물레이션 결과를 이용하여 최종제품에서 유효변형률의 분포가 균일하도록 예비성형체를 설계하고 금형의 마모를 고려한 중간 금형의 형상을 2가지로 제안하여 시물레이션을 마친후 최종제품의 유효변형

를 분포가 나은 형상을 선택하고 최종적인 예비성형체의 형상을 제시하도록 하겠다. 이러한 과정을 거쳐서 선택된 예비성형체와 다이를 이용해 실험을 수행한 후 시뮬레이션의 결과와 비교를 하고 재결정에 따른 조직 및 기계적 특성변화를 예측하고자 한다.

2. 유한요소법을 이용한 벨브의 성형공정 설계

2.1 이론적 배경

금속성형공정의 해석에 효과적이며, 현재 널리 사용되고 있는 수치해법인 강-소성 유한요소법에 대한 이론과 수식화 과정은 이미 널리 알려져 있다[6].

비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function) K를 도입하면, 강-소성 재료에 대한 1차 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta u_i dS = 0 \quad (2.1)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2} (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, σ'_{ij} 는 편차응력, f_i 는 표면외력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률속도이다.

표면외력으로 주로 작용하는 금형과 소재사이의 마찰의 처리를 위하여, 마찰면에서의 중립점발생으로 인한 특이성을 피하여 수치해의 안정성을 고려한 다음의 식을 사용한다.

$$\hat{f} = -mk \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\hat{v}_r|}{u_0} \right) \frac{\hat{v}_r}{|\hat{v}_r|} \quad (2.2)$$

여기서, m 은 마찰상수, k 는 소재의 전단항복응력, \hat{v}_r 은 금형에 대한 소재의 상대 속도, u_0 는 \hat{v}_r 에 비하여 아주 작은 양수이다.

변형률속도가 영(zero)이거나 변형체 내의 변형률속도 보다 아주 작은 경우를 고려하기 위하여 유효 변형률속도가 가정한 유효 변형률속도 $\dot{\epsilon}_0$ 보다 작을 때는 다음과 같이 구성방정식을 수정한다.

$$\dot{\epsilon}'_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_0}{\bar{\sigma}} \dot{\sigma}'_{ij} \quad \text{for} \quad \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_0 \quad (2.3)$$

식(2.2)와 식(2.3)을 식(2.1)에 대입하여 일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 절점속도벡터 \hat{v} 에 대한 비선형 방정식이 된다.

$$\Omega(\hat{v}) = K(\hat{x}, \hat{v}, \bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}) \hat{v} - F(\hat{x}, \hat{v}) = 0 \quad (2.4)$$

여기서 K 는 강성행렬(stiffness matrix), F 는 힘 벡터(load vector), \hat{x} 는 절점좌표 벡터이다. 식(2.4)는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

2.2 벨브의 소성가공공정설계

그림 1은 선박용 디젤엔진 기관의 한 부분인 배기 벨브의 형상과 치수이다. 소재는 Nimonic 80A (니켈 합금)을 사용했다. 기준온도를 1100 °C로 정하여 구해진 유동응력-변형률 및 변형률 속도와의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= f(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}) : \bar{\sigma} = C(\bar{\epsilon})^n (\dot{\epsilon})^m \\ \bar{\sigma} &= 240.0(\bar{\epsilon})^{0.08} (\dot{\epsilon})^{0.17} \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (2.5)$$

열간가공이므로 마찰상수 m 은 0.3으로 하였다[8].

소재의 형상에 따른 소재의 변형양상, 변형률 분포, 파이핑 결함 등을 알아보기 위하여 각각의 반경과 높이를 표 1과 같이 $h \geq 2.5D$ (여기서 h 는 빌렛의 높이, D 는 빌렛의 지름)를 기준으로하여[7] 좌굴 발생한계까지 변화시켰으며, 다이는 뿌리부의 개폐에 따른 하중의 차이를 비교하기 위해 그림 2와 같이 두 종류(Die type-I, II)로 선

정하여 시물레이션을 수행하였다.

2.3 1차 시물레이션 및 결과 고찰

표 1에서 제시한 7가지의 초기빌렛과 2가지의 다이로 9가지 시물레이션을 행하였는데 압출공정의 마지막에 나타날 수 있는 파이핑 결함은 모든 경우에 대하여 발생하지 않았다. 그림 3은 다이 뿌리부가 개방된 case2와 개방되지 않은 case 3의 시물레이션 결과로 초기 빌렛의 크기가 다른 나머지 경우에서도 변형의 양상은 큰 차이가 없었다. 변형은 압출이 일어나기 전에 옆세팅이 먼저 발생하는 형태로 이루어졌다. 이것은 다이 곡률부의 급격한 기울기 변화가 압출방향의 소재 유동을 방해했기 때문이다.

최대 성형하중은 약 2100kN로 그다지 크지않고 다른 모든 경우에서도 거의 같은 결과이다. 이는 옆세팅의 발생 이후 압출이 일어남으로써 Die-type II의 형상이 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다. 그림 4는 9가지 시물레이션의 결과 중에서 유효변형률의 분포를 나타낸 것으로 일반적인 변형집중부위는 곡률의 시작과 끝 그리고 밸브 헤드의 경사임을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 유효변형률 분포의 변형집중 부위가 발생하고 이에 의해 다이와 펀치의 마모가 예상되므로 예비성형체를 설계가 필요하다.

2.3 2차 시물레이션 및 결과 고찰

그림 5는 1차 시물레이션 결과를 바탕으로 설계한 예비성형 다이(Die type-III, IV)의 형상과 치수이다. 2차 시물레이션의 공정은 반경이 16인 소재로 Die-type I과 III로 성형한 Case 10과 동일소재로 Die-type I과 IV로 성형한 Case 11의 두가지이다. Die type-III와 최종다이인 Die-type I로 성형한 시물레이션 결과와 예비성형 Die type-IV와 Die type-I으로 최종성형을 행한 결과가 그림 6과 7에 나타나 있다. Case 10과 11에 대한 예비성형(압출) 및 최종성형(옆세팅)하중은 예비성형과 최종성형에 대해 각각 1590kN, 2090kN과 1810kN, 2090kN으로 나타났다. 그림 8은 Case 10과 11에 대한 최종제품의 유효변형률 분포를 각각 나타낸 것이다. 밸브의 머리 부분에서 최대 변형률 값이 상당히 감소하였으며 균일한 분포를 가짐으로써 다이의 마모를 줄이는 설계방법이 될 수 있다. 이 중 Case 11이 헤드부분에서 소재유동이 균일하게 발생하였으므로 보다 나은 최종제품을 얻을 수 있을 것이다.

3. 실험을 통한 미세조직분석

3.1 실험방법

본 연구에 사용된 원소재 Nimonic 80A의 화학조성은 다음과 같다.

성분	C	SI	Mn	Ni	Cr	P	S	Fe	Ti	Al	Co
비율	0.08	0.03	0.02	Bal.	19.77	>0.005	0.0023	2.75	2.59	1.57	0.03

이 소재는 오스테나이트기지에 탄화물을 석출하여 고온에서 우수한 기계적 성질을 나타낸다. 원소재상태는 완전재결정된 조직을 나타내고 경도는 HV300수준을 유지하고 있다.

설계된 금형과 공정을 이용하여 1600ton 스크류프레스에서 1100 °C의 온도로 밸브 단조를 수행하고 단조품에 대해 조직검사와 경도시험을 하였다. 조직검사는 단조방향에 평행하게 밸브를 절단하여 수행하였는데, 이때 사용된 부식액은 크롬산용액(H₂O 50ml, HCl 150ml, CrO₃ 25g)이며, 100배로 사진촬영 하였다. 한편 단조품에 대한 경도는 비커스 경도기에서 하중 200g으로 측정하였다.

3.2 실험결과

3.2.1 밸브의 조직분포

본연구에서 열간단조한 후 광학현미경으로 관찰한 조직은 그림 9와 같다. 전체적으로 보아 좌우대칭을 이루고 소성변형 이력차이 때문에 부위별로 각기 다른 조직 즉, 소성변형조직, 준재결정조직, 완전재결정조직을 나타내고 있다. 전반적으로 변형량이 적은 (A)와 (B)는 ASTM 결정립도 0의 조대한 조직을 나타내고 있고, 변형량이 크지만 표면부에 위치한 (D)와 (F)부위는 부분재결정 조직을 나타내고 있으며, 변형량이 크지만 금형에 의한 온도강화효과가 큰 (G)부위는 재결정이 일어나지 않고 결정립이 주 변형을 방향으로 연신된 변형조직을 나타낸다. 한편 중심부 (E)는 변형량이 상대적

으로 크고 가공중 온도 강하가 거의 없기 때문에 재결정이 완전히 일어나 전체적으로 결정립의 크기는 30-50 μ m 정도로 나타나고 있고 그 표면부와 중심부 사이에는 부분적으로 재결정이 일어난 양상인 necklace microstructure를 나타낸다.

그림 24에서 가공량이 상대적으로 큰 (D)부위의 조직은 부분재결정이 이루어진 반면 가공변화량이 상대적으로 작은 (H)부위에서는 재결정이 완전히 이루어졌다. 이러한 결과는 소성가공이 이루어지는 온도에 의한 정적 재결정 효과 또한 무시할 수 없음을 나타내고 있다.

3.2.2 밸브의 경도분포

소성가공중 재료의 경도는 전위 집적에 의한 소성가공, 재결정 혹은 전위회복에 의한 연화현상 등에 따라 복합적으로 변한다. 본 실험에서 경도측정시 피할 수 없는 경도값의 산포 때문에 전체 단면에서의 분포를 정확히 나타낼 수는 없지만 HV10차이를 기준으로하여 개략적으로 나타낸 결과는 그림 10과 같다. 전체적으로 경도는 HV280 - HV350의 범위를 유지하고 있어 최대로 HV70의 차이를 보이고 있다.

4. 유한요소시뮬레이션과 실험의 비교

그림 24를 보면 밸브 헤드의 바깥쪽에서 안쪽방향(G→E)으로 갈수록 경도가 전체적으로 가장 낮은 수준을 보이면서 증가하는 양상을 보이고 있으며 구배가 심한 부분의 표면(A)에서 가장 높은 경도를 보여주고 있다. 또한 밸브 단면의 중앙부분에서는 헤드에서 축부분으로 멀어지면서 경도가 증가했다가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 점들은 case 11의 시뮬레이션 결과중 유효변형률 분포와 비교해볼 때 거의 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

유한요소법을 활용하여 밸브의 소성가공 공정을 설계하고 이것을 바탕으로 수행된 실험의 결과는 이상과 같다. 밸브의 예비성형체 설계시 초기소재와 최종제품의 중간형상을 가진 예비성형체를 예상하였으나, 1차 시뮬레이션 결과 소재의 형상에 관계없이 옆세팅이 먼저 발생하여 이러한 예비성형체는 성형횟수의 증가만을 가져오게 되었다. 따라서 예비성형 다이를 설계하여 압출을 어느 정도 발생시킨후 최종다리로 성형하는 방법이 최종제품에 있어 유효변형률의 분포가 일정하여 변형집중 부위가 없고 다이의 마모도 줄일 수 있어 유리하다는 결론을 내렸다. 또한 설계된 공정에 의해 수행된 실험을 통해 얻어진 경도분포가 시뮬레이션에서의 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. T. Altan, S.I. Oh and H.L. Gegel, "Metal Forming: Fundamentals and Application", ASME series in Metal Processing, 1983.
2. S. Kobayashi, "The mechanics of Plastic Deformation in Metal Forming", Proc. Applied Mech., June, 1978.
3. R. Hill, "A General Method of Analysis of Metal-working Process", J. Mech. Phys. Solid, vol.11, 1963.
4. R.L. Bodnar, D.C. Bramfitt and D.C. Shah, "Physical Modeling of Hot-Deformation Processes-Using Plasticine", Proceeding of the 26th Mechanical Working and Steel Proceeding Conference, ISS/AIME, 1985.
5. G.B. Yu and T.A. Dean, "A Practical Computer-Aided Approach to Mould Design for Axisymmetric Forging Die Cavities", Int. J. Mech. Tool Des. Res., Vol. 25, No. 1, pp. 1-3, 1985.
6. S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Altan, "Metal Forming and the Finite-Element Method", Oxford Univ. Press, 1989.
7. K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill Book Co. 1985.

Exhaust Valve Simulation			
Total Volume = 24,329 mm ³			
Simulation Vol. = 24,500 mm ³			
Case	Radius	Height	Note
1	r = 25.0(die type - I)	h = 12.5(die type - I)	
2	r = 25.0(die type - I)	h = 12.5(die type - I)	
3	r = 20.0(die type - I)	h = 19.5(die type - I)	
4	r = 20.0(die type - I)	h = 19.5(die type - I)	서랍라이선은 커
5	r = 19.0	h = 21.6	불림 관계까지 안
6	r = 18.0	h = 24.1	수출
7	r = 17.0	h = 27.0	
8	r = 16.0	h = 30.5	
9	r = 12.0	h = 54.2	

Table 1 Billet Dimension of 9 Cases of Simulation

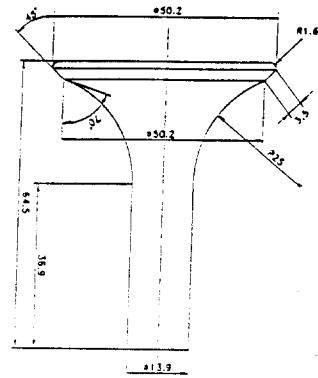


Fig. 1 Shape and Dimension of valve desired to be deformed

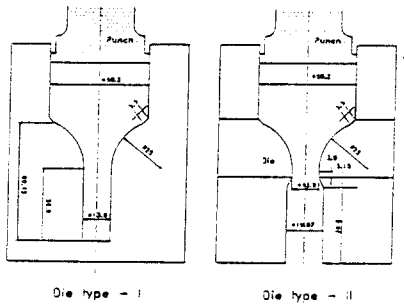


Fig. 2 Dimension of two Die types for 1st simulation

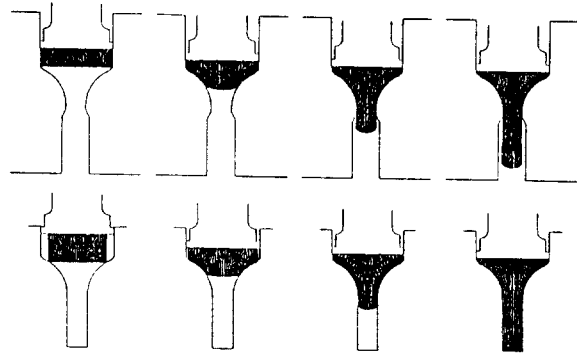


Fig. 3 Results of simulations of case 2 and 3

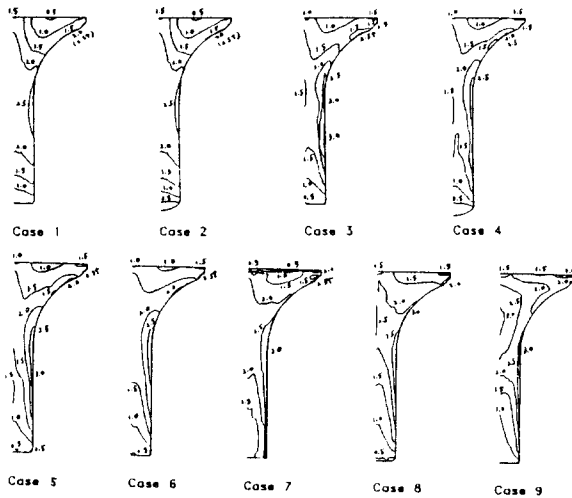


Fig. 4 Distribution of effective strain of 9 cases

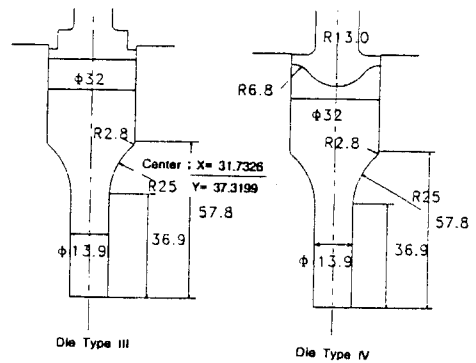


Fig. 5 Dimension of two preform Die types for 2nd simulation

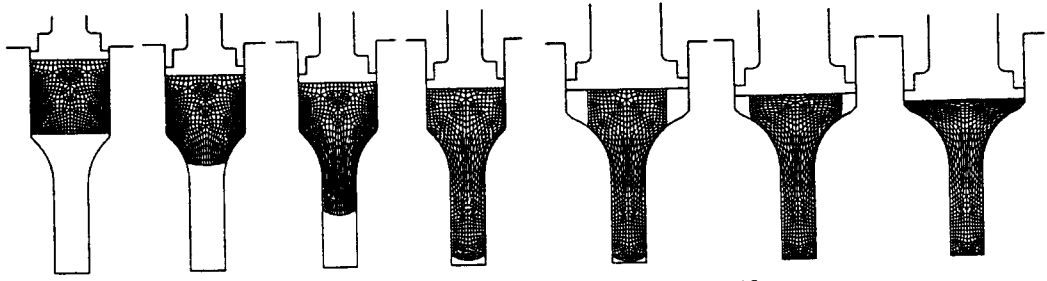


Fig. 6 Result of simulations of case 10

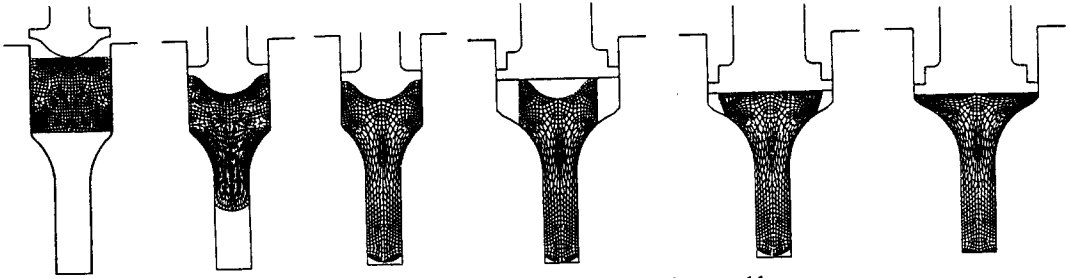


Fig. 7 Result of simulations of case 11

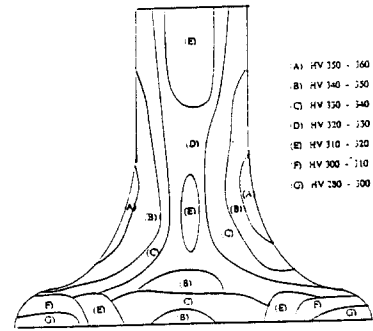
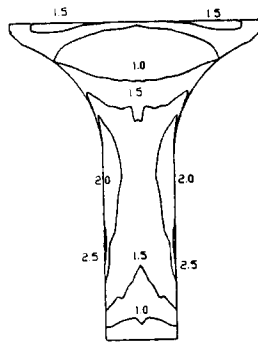
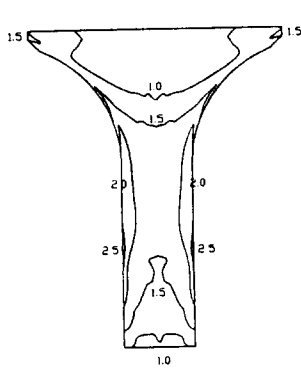


Fig. 8 Distribution of effective strain of case 10 and 11

Fig. 10 Variation of Hardness with location

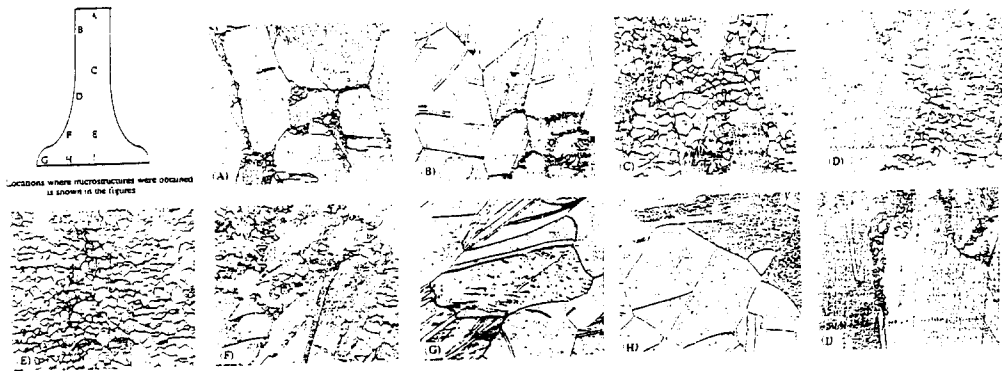


Fig. 9 Micro-Structure view of valve deformed