

## 폭연신계수를 이용한 플랜지단조의 초기형상설계

\*김진영, 박종진  
\*홍익대학교 대학원, 홍익대학교 기계공학과

### Preform Design by Use of Spread Coefficient for Flange Forging

\*J. Y. Kim and J. J. Park  
\*Graduate School, Hong-Ik University  
Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

#### Abstract

A large crank shaft for ship engine consists of several components, such as throw, journal, pin and flange. These components are individually made by open-die forging followed by machining and they are thermally fitted to form the crankshaft. In the present investigation, it was attempted to design an optimum preform for the throw by use of the spread coefficient. The spread coefficient found in the literature was confirmed by comparison with experimental results using plasticine. However, the preform designed by the spread coefficient was unable to produce the final product. The reason was found that the spread coefficient differs distinctly for the magnitude of bite ratio. Therefore, another spread coefficient, especially for low bite ratios, was proposed and the preform was redesigned. It was found that the new preform was able to produce the final product.

Key Words; Spread coefficient, Crank throw, Plasticine, Preform, Bite ratio

#### 1. 서론

대형 선박용 엔진에 장착되는 크랭크축은 스톱, 저널, 플랜지부분을 각각 가공한 후 이들을 열박음(thermal fitting)하여 조립함으로써 제작된다. 이러한 크랭크축은 매우 고가이며

소량생산이므로 제품에 하자가 발생할 경우 큰 손실을 가져오게 된다. 따라서 이러한 제품을 생산할 경우에는 경험과 더불어 사전에 생산공정에 대한 면밀한 검토가 꼭 필요하다. 이러한 부분은 주로 자유단조(open-die forging)에 의하여 생산되는데, 자유단조가공에서 생산비를 줄일 수 있는 작업으로는 절단작업과 블룸단조작업이 있다. 만약 블룸형상을 최적화하여 최종가공후의 소재가 원하는 최종형상의 치수에 가깝게 된다면 절단 작업을 줄일수 있게 된다.

크랭크 스톱의 플랜지 단조시 하부다이는 고정되어 있고 상부다이는 상하운동을 하여 소재의 두께를 감소시킨다. 이러한 작업시 소재는 두께감소뿐만이 아니라 폭방향과 길이방향으로 연신하게된다. 두께감소에 따른 폭과 길이방향으로의 연신은 다음의 네가지 요소에 의하여 변화하게된다. 즉 다이의 폭, 소재의 두께, 소재의 넓이, 압하율이다. 본 연구에서는 연신과 이들의 상호관계를 밝히고 초기 블룸의 형상이 연신되어 크랭크 스톱의 플랜지형상을 단조하게 될 때 원하는 날개부의 길이방향과 폭방향치수를 최적으로 얻기위한 초기 블룸의 길이, 폭, 높이를 정하는 것이 목적이다. 초기블룸을 설계하는데 이용한 방법은 폭연신계수를 이용하여 일정량 압축시 발생하는 연신량을 예측하여 역으로 필요한 초기블룸을 설계하는 것이다. 먼저 폭연신계수는 플라스틱인 실험으로 부터 구한 값과 Tomlinson[1]이 제안한 값을 비교하여 플라스틱인 실험으로 강의 폭연신을 예측할 수 있는지의 타당성을 검토하고, Tomlinson이 실험을 통하여 제한한 폭연신계수를 사용하여 해석된 결과를 바탕으로 역추적하여 초기블룸의 체적과 형상을 설계하였다. 설계된 초기블룸의 형상을 플라스틱인을 이용하여 1/15축소모양으로 실험하여 이론과 실험이 일치하는지 확인하였다. 실험결과 바이트비가 낮은 영역에서의 새로운 폭연신계수의 제안이 필요함을 알게되었다. 바이트비가 낮은 영역에서의 폭퍼짐실험결과를 통해 바이트비가 낮은 영역에서는 Wistreich[2]가 제안한 폭연신계수가 실험과 잘 맞는다는 것을 알았다. 따라서 Wistreich의 폭연신계수를 이용하여 크랭크 스톱의 최적의 초기블룸의 체적과 형상을 설계하고 플라스틱인 1/15축소실험으로 이 폭연신계수를 이용하여 설계한 형상이 실험과 일치함을 확인하였다.

## 2. 폭연신 계수

대형자유단조는 유압프레스를 이용하여 크고 비교적 형상이 간단한 제품을 생산한다. 일반적으로 피가공물이 금형보다 크기 때문에 변형이 피가공물의 일부에 한정된다. 변형의 주 형태는 가로방향으로의 압축이다. 크랭크 스톱의 초기블룸의 모양을 결정하기 위해서는 단조공정시 발생하는 소재의 폭연신과 길이연신을 고려해야 한다. 즉 크랭크 스톱의 초기 블룸형상에서 최종날개를 만들기까지 각 압착공정에서 발생하는 폭연신과 길이연신을 고려하여 최적으로 블룸모양을 설계해야 한다. 연신에 미치는 주요인자로는 단조 전후의 높이비인 압착비(squeeze ratio)와 틀의 폭에 대한 시편의 폭 비인 바이트비(bite ratio)이다. 본 해석에서는 바이트비를 일정하게 하는 대신 바이트의 폭을 패스(pass)당 일정하게 유지하였다. 그 이유는 초기 블룸의 모양이 나비넥타이형태이므로 블룸폭이 길이방향으로 일정하지 않아 실제공정에서 바이트비를 일정하게 유지하기 어렵기 때문이다. 소재의 자유단조시 폭연신과 길이연신을 해석하기 위해 Tomlinson이 정의한 폭연신계수(S)를 사용하였다. 폭연신

계수의 정의는 식 (1)과 같이 두께방향으로의 압착에 대한 폭방향으로의 연신비율을 뜻한다.

$$s = \frac{\text{폭 연신율}}{\text{두께 수축율}} = \frac{\ln \frac{w_1}{w_0}}{\ln \frac{h_0}{h_1}} \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $w_0$ 는 압착전 시편의 폭,  $w_1$ 는 압착후 시편의 폭,  $h_0$ 는 압하전 시편의 높이,  $h_1$ 는 압하후 시편의 높이를 의미한다.

만약 폭연신계수가 0이면 모든 변형이 길이방향연신으로 나타나고 1이면 변형의 전부가 폭연신으로 나타난다. 식(1)로 부터 압착비와 폭연신계수를 안다면 폭과 길이의 변화량을 예측할 수 있다. 소재높이의 변화비는 단조작업에서 조절이 가능하다. 따라서 소재의 폭연신을 정량적으로 예측하기 위하여는 폭연신계수를 구하면 된다. 그런데 폭연신계수에 영향을 미치는 주요 인자는 바이트비이다. 즉 폭연신계수를 실험이나 경험을 통해 얻을 수 있다면 간단히 소재의 연신을 계산할 수 있다. Tomlinson은 실험을 통하여 식(2)와 같이 폭연신계수를 바이트비의 함수로 표현하였다. 그들은 1000-1200℃ 범위의 각각 다른 온도에서 저탄소강 (0.2%C)을 사용하여 표면이 곡면인 형상에서 단지 바이트비만이 폭연신계수에 미치는 중요한 인자임을 알아내었다. 즉 단조온도, 높이감소인자, 단면모양은 폭연신계수의 값에 중요한 영향을 미치지 않는다는 것이다.

$$S = 0.14 + 0.36(b/w) - 0.054(b/w)^2 \dots \dots \dots (2)$$

일반적으로 플라스틱은 금속이 고온에서 거동하는 것과 매우 유사한 성질을 갖는 물질로 각종 모사실험에서 많이 사용되고 있는 재료이다. 하지만 폭연신계수를 사용하여 크랭크 스톱의 최적의 초기 블룸을 얻기 위해서는 플라스틱의 폭연신계수와 Tomlinson이 강을 사용하여 열간상태에서 구한 폭연신계수가 유사한지를 검토하여야 한다. 그러므로 먼저 플라스틱의 폭퍼짐실험을 하여 나온 값과 Tomlinson의 실험을 통한 값을 비교하여 플라스틱으로 강의 폭연신을 표현할 수 있는지의 타당성을 검토하였다. 플라스틱의 폭퍼짐실험에 사용된 바이트비는 0.86, 0.88, 0.89, 1.72, 1.77, 1.81이었으며 단조시 속도는 10mm/min이었고 50ton 용량의 UTM을 사용하였다. 탄산칼슘을 사용하여 소재의 윤활상태를 적절히 유지하였다. 그리고 소재의 폭과 높이는 최대값과 최소값의 평균값을 사용하였다. 플라스틱으로 부터 구한 폭퍼짐계수를 바이트비에 따라 Tomlinson이 제안한 폭퍼짐계수와 비교하여 그림 1에 나타내었다. 그림 1에 나타난 것처럼 플라스틱의 폭연신계수와 Tomlinson이 제안한 폭퍼짐계수가 비슷한 기울기로 바이트비가 증가할수록 폭연신계수가 증가하고 있다. Tomlinson이 제안한 식(2)가 바이트비만의 2차함수라는 것과 같이 플라스틱의 폭연신계수도 바이트비의 유사한 2차함수형태를 보이고 있다. 따라서 플라스틱 실험을 통하여 폭연신을 예측하고 이를 이용하여 초기블룸형상을 설계할 수 있다고 판단되었다.

플랜지단조시 사용할 화이트비는 0.4이하인데 플라스틱인 폭퍼짐실험으로부터 구한 폭연신계수와 Tomlinson이 제안한 폭연신계수값은 화이트비가 0.4이상의 값을 기초로 구한 것이었다. 따라서 화이트비가 0.4이상의 플라스틱인과 강의 폭연신특성으로보아 0.4이하에서도 두재료가 폭연신이 같은 경향을 보인다고 가정하고 플라스틱인의 폭퍼짐실험을 통하여 화이트비가 낮은 영역에서의 폭연신의 경향을 파악하고 새로운 폭연신계수를 제안하고자 하였다. 실제로 강의 열간단조실험을 통하여 플라스틱인과 강이 화이트비가 낮은 영역에서도 폭연신이 유사함을 증명해야하나 실험하기가 어려움으로 인해 다음의 모사실험을 수행하였다. 화이트비가 낮은 영역에서 플라스틱인의 폭퍼짐실험을 통해나온 결과는 그림 2에 나타내었다. 화이트는 15mm를 사용하였고 화이트비는 0.156, 0.169, 0.170의 세경우에 대하여 되도록 압착비는 1.1이 되도록 실험하였다. 화이트비가 낮은 영역에서의 폭퍼짐 실험결과를 보면 화이트비가 0.156에서는 폭연신계수가 약 0.15로 수렴하고 있는 경향을 보이고 있다. 만약 화이트비가 큰 영역(0.4 이상)에서 사용하였던 Tomlinson이 제안한 식(2)를 사용하면 화이트비가 0.156에서는 폭연신계수가 0.214정도가 나온다. 즉 두 폭연신계수의 차이는 약 30%정도 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 위 실험을 통하여 화이트비가 낮은 영역에서의 폭퍼짐계수는 화이트비가 큰 영역에서와는 다른 함수형태를 가져야함을 알 수 있다. 그리고 화이트비가 낮아질수록 급격히 폭연신계수가 작아지는 현상을 알 수 있다. 실험값을 이용하여 화이트비가 낮은 영역에서의 새로운 폭연신계수는 Wistreich가 경험적으로 제안한 폭연신계수와 유사함이 밝혀졌으며 이는 식(3)과 같이 표현된다.

$$S = \frac{b/w_0}{1 + (b/w_0)} \dots \dots \dots (3)$$

### 3. 초기형상설계

크랭크 스톱의 최종날개형태는 그림 3과 같이 사다리꼴의 형태를 띄어야 한다. 따라서 초기 블룸의 형태도 비슷한 형상을 가져야 단조작업을 통하여 최종날개형상이 만들어질 수 있다. 원하는 날개모양 치수중 가장 중요한 부분은 블룸에서 압착하여 연신된 날개의 바깥쪽 부분이 1600mm가 되어야 하는 것이다. 날개의 안쪽 부분은 핀(pin)부의 길이인 900mm가 짧게 만드는 것이다. 날개의 안쪽부분과 바깥부분치수를 맞추기 위해서는 안쪽부분(핀과 연결된 부분)을 만드는 공정과 바깥쪽부분을 만드는 공정을 달리 고려해야 한다. 하지만 공정이 복잡해지는 단점 때문에 먼저 바깥쪽 날개부분의 치수를 구한 후 이를 안쪽부분에 그대로 적용시켜 안쪽부분이 얼마만큼 폭방향으로 연신될 수 있는지 예측해 보았다. 따라서 초기블룸설계에서 안쪽부분의 치수는 900mm로 고정하였다. 크랭크 스톱의 날개부분은 핀부분을 중심으로 좌우대칭이기 때문에 한쪽 날개부분만을 해석하였다. 먼저 연신을 고려한 해석에 들어가기 전에 체적불변의 법칙을 이용하여 최종날개모양의 부피를 계산한 뒤 대략의 초기 블룸모양을 추정할 때 다음과 같은 가정이 필요하였다: (1) 크랭크 스톱의 날개부분은 안쪽이 900mm, 바깥쪽이 1600mm인 사다리꼴의 모양이고 길이가 1450mm, 높이가 350mm이다. (2) 해석상 블룸안쪽부분의 치수( $y_1$ )는 핀부분의 길이인 900mm를 사용한다.

(3) 블룸의 초기높이는 1100mm이다. 최종단조작업에서의 블룸의 높이는 350mm가 된다. 이와 같은 가정을 이용하여 계산하면 날개모양의 체적은  $6.34 \times 10^8 \text{mm}^3$ 이 된다.

그림 3과 같이 블룸의 길이를  $x$ 로 가정하고 폭을  $y_1, y_2$ 로 가정한 후 계산을 통하여 나온 체적이 날개의 체적과 같아야 하므로 이것을 이용하여 블룸모양을 추정하였다. 여기서는  $y_1$ 을 900mm로 가정하면 블룸의 체적은 날개모양의 체적과 같아야한다. 즉,

$$\left(\frac{y_1 + y_2}{2}\right) \times x \times 1100 = 6.34 \times 10^8 \text{mm}^3$$

위에서 가능한  $x$ 와  $y_2$ 를 임의적으로 선택하여 블룸모양을 다음과 같이 가정하였다: (1)  $y_2 = 1100\text{mm}$ ,  $x = 575\text{mm}$ , (2)  $y_2 = 1200\text{mm}$ ,  $x = 547.62\text{mm}$ , (3)  $y_2 = 1250\text{mm}$ ,  $x = 534.88\text{mm}$ .

위와 같은 블룸의 모양을 기초로 폭연신계수를 사용하여 바깥쪽의 폭방향연신이 1600mm가 될 수 있는 최적의 블룸형상을 설계하였다. 실제 작업중에서 일어날 수 있는 랩(겹침)현상을 방지하기 위하여 압착비( $h_0/h_1$ )는 1.3보다 작게 하였다. 또한 불균질변형을 최소로 줄이기 위하여  $b/h_0$ 는 0.33보다 작게하였고 바이트의 폭은 실제 공정을 고려하여 500mm를 넘지 않게 하였다. 그리고 해석상 바이트비를 일정하게 하기 위해서는 한 패스당 바이트의 폭을 일정하게 유지하였고 가능한 바이트의 폭을 처음 패스부터 마지막 패스까지 일정하게 유지하였다. 여기서 패스는 블룸의 높이를 일정하게 만드는 압착작업의 연속을 말한다. 즉 한 패스가 지나면 날개부분이 될 블룸의 높이는 일정량만큼 늘려지게 되어 같아지게 된다. 위와 같은 방법을 이용하여 Tomlinson이 제안한 식(2)와 Wistreich가 제안한 식(3)을 이용하여 초기형상을 설계해 보았다. 먼저 Tomlinson이 제안한 식(2)를 사용하여 설계해 보았다. 실제 단조작업을 고려하여 바이트는 250mm, 400mm를 이용하였다. 그리고 압착비는 1.05, 1.1의 두경우에 대하여 해석을 수행하였다. 그런데 압착비가 1.05에서 1.1로 증가함에 따라 폭방향으로의 연신이 다소 증가하여 초기 블룸 날개의 폭은 약간 감소하나 무시할 수 있을 정도이므로 1.1을 사용하였다. 즉 표 1에 나와있는 초기 블룸날개의 치수는 1100mm높이의 소재에서 350mm까지 단조하여 연신시킬때 폭방향의 길이가 1600mm가 나오기 위한 치수이다. 그리고 안쪽날개부분의 폭900mm에 대하여 같은 방법으로 폭연신계수를 이용하여 나온 최종날개의 폭을 표 1에 나타내었다. 다음으로 바이트비가 작은 영역에서의 Wistreich가 제안한 식(2)를 사용하여 초기형상을 다시 설계하였다. 설계된 초기 블룸날개의 형상은 표 1에 나타나있으며 바깥쪽 날개부분의 치수는 1355mm이다. Tomlinson이 제안한 폭연신계수가 Wistreich가 제안한 폭연신계수보다 약간 커서 같은 높이압축량에서 폭방향으로의 길이증가가 더 크므로 초기블룸 날개의 폭은 그 만큼 감소하게 된다. 그리고 바이트비가 증가할수록 초기 날개의 폭은 감소한다. 즉 바이트비가 증가할수록 폭방향으로의 연신이 증가한다.

#### 4. 플랜지 단조실험

Tomlinson이 제안한 폭연신계수를 사용하여 초기블룸형상을 설계한 경우중에 바이트의

폭이 250mm를 사용하여 나온 결과값과 1/15로 축소하여 플라스틱을 이용한 단조실험결과가 잘 일치하는지 확인해 보았다. 실험결과 초기 블룸의 날개높이가 1100mm에서 350mm까지 단조후 바깥쪽 날개부분이 1600mm가 되어야 하는데 실제로는 약 1500mm가 나왔다. 따라서 위에서 제안한 폭연신계수는 바이트비가 낮은 영역에서는 사용할 수 없음을 알 수 있었다. 다음으로는 Wistreich가 제안한 폭연신계수를 이용하여 초기블룸형상을 설계하고 1/15축소하여 플라스틱으로 제작하여 실험해 보았다. 바이트의 폭은 250mm를 사용하였다. 결과가 표 2와 같고 새로이 제안한 바이트비가 작은 영역에서의 폭연신계수가 플라스틱의 폭연신을 정확히 예측하고 있다. 따라서 플라스틱과 강의 폭퍼짐 현상이 바이트가 낮은 영역에서도 비슷하다면 위에서 제안한 폭연신계수가 유효하다. 그런데 실제로 크랭크 스톱의 날개부분은 양옆으로 20mm의 가공여유가 필요하므로 전체적으로 날개부의 길이는 40mm가 증가하여야 한다. 따라서 최종 제품의 바깥쪽부분의 날개의 폭은 1640mm가 되어야 한다. 그리하여 날개의 길이방향으로의 길이를 1450mm에서 가공여유 30mm를 고려하여 1480mm로 설계하였다. 가공여유를 고려하여 크랭크 스톱의 초기 블룸날개형상을 다시 설계하여 그림 4에 나타내었다. 사용된 바이트의 폭은 250mm이고 압착비는 1.1이다. 초기 블룸형상에서 바깥쪽 날개부분의 치수는 1395mm이다. 실험결과는 표 2에 나타내었으며 위에서 정의한 새로운 폭연신계수가 실제실험과 매우 잘 맞고 있다. 따라서 위에서 설계한 초기 블룸의 형상이 크랭크스톱의 날개형상을 만들기 위한 최적의 블룸형상으로 판단되었다. 위의 초기 블룸형상에서 최종 날개형상으로 나오는 실험과정을 사진 1에 나타내었다. 사진 (a)는 직육면체의 블룸형태에서 중앙 핀부의 폭길이인 900mm를 맞추어 그림 4와 같은 형태의 초기 블룸형상을 만드는 과정이며 작업이 완료되었을때의 모양이 사진 (b)이다. 사진 (c)는 핀부와 연신되어 날개부분이 될 영역을 구분해 주는 작업이다. 사진 (d)는 평다이를 사용하여 날개부가 연신되기 시작하는 장면이다. 사진 (e)는 350mm높이까지 단조하였을때의 소재의 모양이고 사진 (f)는 크랭크 스톱의 날개부분을 만드는 작업이 완료되었을때의 장면이다.

## 5. 결론

대형 크랭크 스톱의 날개형상을 자유단조로 만들기 위한 초기블룸의 최적형상을 폭연신계수를 사용하여 설계하고자 하였다. 먼저 플라스틱의 폭퍼짐실험으로부터 구한 폭연신계수와 Tomlinson이 실험으로부터 구한 열간에서의 강의 폭연신계수를 비교하여 본 결과 두 재료의 폭연신이 매우 유사함을 알 수 있었다. 즉, 두 경우 모두 폭 연신계수는 바이트비의 유사한 2차함수로 표현되고 있다. 하지만 실제로 플라스틱으로부터 구한 폭연신계수를 가지고 초기블룸을 제작하여 실험한 결과 이론적으로 구한 값과는 오차가 커 원하는 최종형상을 만들 수 없었다. 그 원인으로 바이트비의 크기에 따라 폭연신계수가 크게 변화한다는 사실을 알아내었다. 따라서 바이트비를 0.4이하로 하여 플라스틱의 폭퍼짐실험을 다시 수행하여 바이트비가 작은 영역에서의 새로운 폭퍼짐계수를 제안하였다. 이 폭퍼짐계수는 Wistreich가 경험적으로 구한 식과 유사함을 알 수 있었다. 새로운 폭퍼짐계수를 가지고 초기형상을 설계하고 실험을 통하여 바이트비가 작은 영역에서 새로이 제안한 폭연신계수가 타당함을 밝혔다. 끝으로 실제 날개형상의 가공여유를 고려하여 최적의 블룸의 형상을 설계

하고 실험을 통하여 위에서 설계한 형상의 타당성을 증명하였다.

### 6. 참고 문헌

- (1) A. Tomlinson and J. D. Stringer, "Spread and elongation in flat tool forging", Journal of The Iron and Steel Institute, October 1959.
- (2) J. G. Wistreich and A. Shutt, "Theoretical analysis of bloom and billet forging", Journal of The Iron and Steel Institute, October 1959.
- (3) 이 동 념, "소성가공학", 문운당, pp.300~302.

표 1. Tomlinson의 폭연신계수<식 (2)>와 Wistreich의 폭연신계수<식 (3)>를 이용한 초기블룸 날개의 폭 설계

(단위 : mm)

바이트의 폭		Tomlinson의 폭연신계수사용		Wistreich의 폭연신계수 사용	
		w <sub>0</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>0</sub>	w <sub>1</sub>
250	안쪽 날개	900	1165	900	1131
	바깥쪽 날개	1270	1600	1355	1600
400	안쪽 날개	900	1227	900	1235
	바깥쪽 날개	1217	1600	1241	1600

표 2. Wistreich의 폭연신계수를 이용한 초기블룸형상의 플라스틱인 단조실험결과

(단위 : mm)

바이트의 폭	Initial wing length (w <sub>0</sub> )	Final wing length (w <sub>1</sub> )
250	1355	1575
"	1355	1597.5
"	1395	1620
"	1395	1645
"	1395	1662.5
"	1395	1630
"	1395	1627.5

※ 플라스틱실험에 사용된 모형은 실제치수의 1/15로 축소하여 제작하였음.





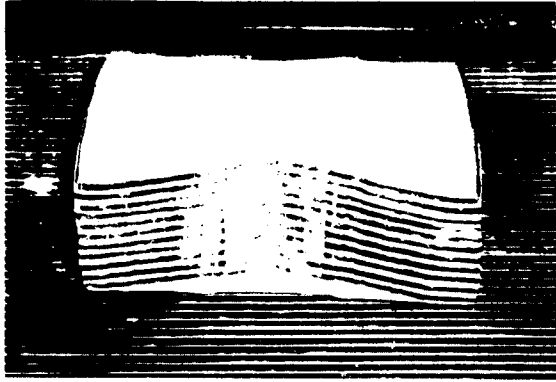


사진 (a)



사진 (b)

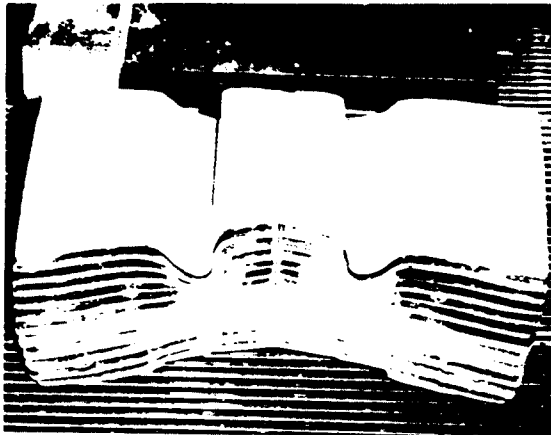


사진 (c)

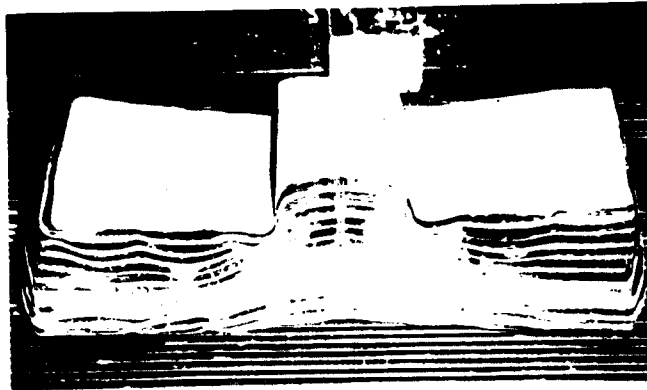


사진 (d)

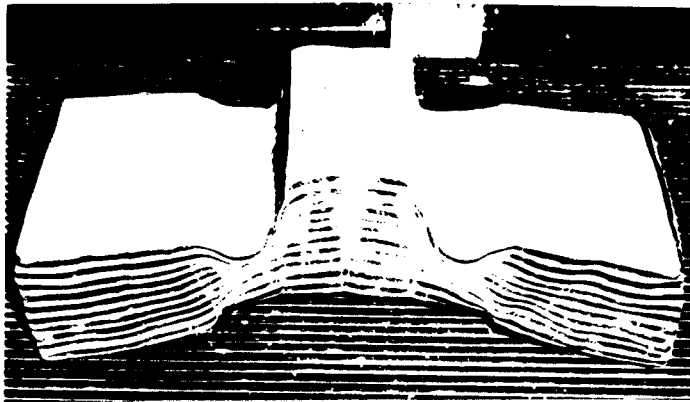


사진 (e)

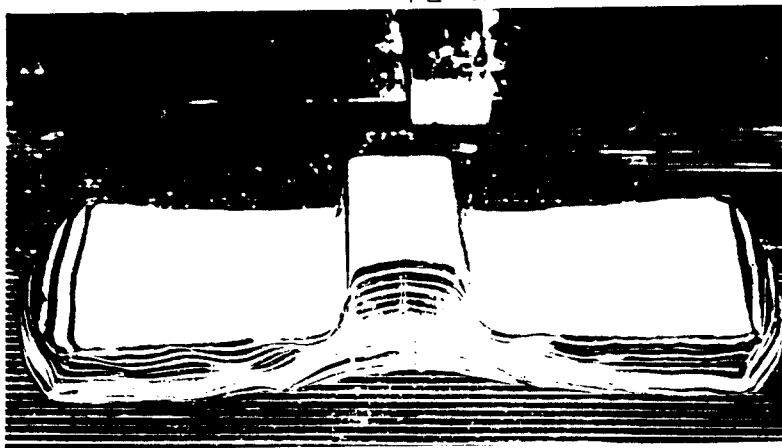


사진 (f)

사진 1. 플랜지 단조의 플라스틱인 모사실험