

## 열간단조를 이용한 브라운관 금형의 개발에 관한 연구

차도진\* · 조종래\*\* · 배원병\*\*\* · 황남철\*\*\*\*

(2000년 7월 13일 접수)

### A Study on the Development of Cathode-Ray Tube Die Using Hot Forging

D. J. Cha, J. R. Cho, W. B. Bae and N. C. Hwang

#### Abstract

This study has been carried out to develop a CRT die using hot forging. The conventional CRT die made by casting has defects such as void and inclusion. These defects of the cast die make micro-spots on the surface of the CRT which affect the quality of the final product. So, a hot forging process is developed to avoid these defects of CRT die by the model material test and the rigid-plastic FEM. Firstly, model material tests are carried out with plasticine billets in order to investigate the material flow pattern in the die cavity and to get the reasonable initial values for designing the preform in the FE simulation. And then a finite element analysis has been performed to predict the preform and the forging load of a CRT die. We also suggest an integrated die-set which combines two die-sets into one die-set to save manufacturing time and cost in case of similar die-size.

**Key Words** : Cathode-Ray Tube(CRT) Die, Hot Forging, Model Material Test, Rigid-Plastic FEM, Preform Design

#### 1. 서론

컴퓨터와 텔레비전의 발달로 브라운관(cathode-ray tube)은 사회 전반에 걸쳐 폭넓은 분야에서 사용되고 있다. 특히 외국의 현지 공장을 포함한 우리 나라의 브라운관 생산량은 전세계 시장의 35~40%를 차지하고 있으며 또한 그 수요가 점차 증가하는 추세이다.

현재 브라운관의 제조 방법은 유리를 반응용 상태로 만들어 고온의 금형에 넣고 압력을 가하여 원하는 브라운관으로 성형한 후 냉각하는 것이다. 이 경우 금형은 그 표면이 깨끗해야 하고 강도가 우수하여 내구성을 갖춰야 한다. 기존의 주조에 의한 브라운관 금형 구조물은 브라운관이 20인치 이상으로 대형화함에 따라 구조적인 구조결함과 금형의 경량화에도 한계가 있다. 특히 금

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
\*\* 한국해양대학교 공과대학 기계정보공학부  
\*\*\* 부산대학교 공과대학 기계공학부  
\*\*\*\* 한국중공업 기술연구원

형의 사용횟수가 증가함에 따라 표면의 주조조직 속에 있는 석출물과 개재물이 빠져 나와 제품의 표면에 미세한 홈이 발생한다.

본 연구의 목적은 기존 주조로 만들어진 브라운관 제조용 금형의 결함을 없애기 위해 경제성과 기계적 성질이 우수한 제품을 얻을 수 있는 열간단조 공정을 제시하고 소재의 성형성을 판단하여 예비성형체와 단조공정을 설계하는 것이다. 또한 크기가 비슷한 두 종류의 금형을 통합하여 하나의 금형에서 제작할 수 있는 통합 금형에 의한 제작방법을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 수치해석 방법으로 상용 강소성 유한요소코드인 DEFORM<sup>(1)</sup>을 사용하였으며, 상온에서의 역학적 성질이 고온에서의 강(steel)과 비슷한 플라스틱인(plasticine)<sup>(2)</sup>을 사용하여 모델재료실험을 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 강소성 유한요소법

강소성 유한요소법은 재료의 탄성부분에 대한 고려를 하지 않음으로써 복잡한 문제에 대해 보다 수월하게 접근할 수 있는 방법으로 실제의 성형 문제에 많이 이용되어왔다. 강소성 유한요소법에 대한 수식화는 많이 알려져 있으며 간단히 소개하면 다음과 같다.

강소성 재료에 대한 변분<sup>(3)</sup>은 다음과 같다.

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

여기서,  $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2(\sigma_{ij}' \sigma_{ij}')}$ ,  $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3(\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})}$ ,  $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$ , K는 벌칙상수이다. 한편 금형과 소재간의 마찰조건<sup>(4)</sup>은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{f} = -\frac{2}{\pi} m k \tan^{-1} \frac{|\dot{V}_s|}{u_o} \dot{t} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 마찰계수이고,  $k$ 는 소재의 전단항복응력이며  $u_o$ 는  $|\dot{V}_s|$ 에 비해서 매우 작은 양수이다.  $\dot{V}_s$ 는 금형에 대한 소재의 속도벡터이고  $\dot{t}$ 는  $V_s$  방향의 단위벡터이다. (1)식은 뉴턴랩슨법을 이용하여 해를 구하

며 초기 속도장은 직접반복법(direct method)을 이용하여 구한다.

### 2.2 모델재료와 실제재료의 상사식 유도

실제 열간단조공정과 모델재료 실험이 상사성을 이루기 위해서는 소성영역에서 응력과 변형률속도 관계식이 서로 유사해야 한다. 또한 재료와 금형 사이의 마찰조건이 거의 같아야 한다. 강의 유동응력이  $\sigma_s = A \dot{\epsilon}_s^m$ 이고 플라스틱인의 유동응력이  $\sigma_p = B \dot{\epsilon}_p^n$ 일 때 강과 모델재료의 하중에 대한 상사식<sup>(4)</sup>은 다음과 같이 표현된다.

$$F^* = \left(\frac{A}{B}\right) \frac{l^{*2}}{t^{*n}} \quad (3)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}_s^m = \dot{\epsilon}_p^n$ 이고  $l^*$ 와  $t^*$ 는 각각 길이와 시간의 척도이다.

## 3. 모델재료실험과 유한요소해석

### 3.1 모델재료실험

브라운관은 판넬(panel)과 펀넬(funnel) 유리의 접합으로 만들어지며 이런 유리의 제작용 금형은 플런저(plunger)와 하부(bottom) 모델의 두 종류로 구성된다. 본 연구에서는 29인치 브라운관의 펀넬용 금형의 실제 크기보다 1/6 축소된 모델을 사용하였다. 실험에 사용한 금형의 제작은 액상분말 주조법<sup>(5)</sup>을 이용하였으며 각각 상부와 하부 금형으로 구성되고 Fig. 1과 Fig. 2와 같다.

실험에 사용된 예비성형체의 각각의 치수와 종류는 Table 1과 같다. 성형성을 검증하기 위한 예비성형체는 검정색과 흰색의 플라스틱인을 적층하여 제작하였다. 플런저 모델에 대한 예비성형체의 모양은 Fig. 3과 같다. 모델재료의 성형성 실험에서 사용한 윤활제는 마찰계수

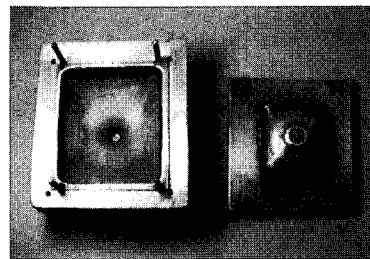


Fig. 1 Die shapes for the plunger

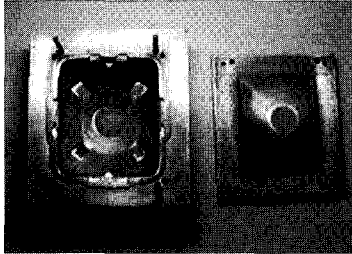


Fig. 2 Die shapes for the bottom

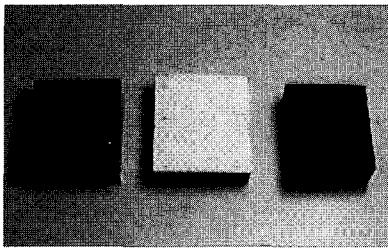


Fig. 3 Preform shapes for the formability test of plunger

Table 1 Dimensions of the preform for model test (unit : mm)

Billet No.	Plunger	Bottom
①	26×86×70	20×85×71
②	23×92×74	16×93×78
③	30×81×66	23×78×66

0.6으로 알려진 베이비 파우더를 사용하였다<sup>6)</sup>. 또한 상부 모델 금형의 압하 속도를 0.5mm/sec로 하고, 실험실 내의 온도는 25℃로 유지하였다.

실험에 사용한 플라스틱의 응력과 변형률 속도의 관계식<sup>6)</sup>은 (4)식과 같다.

$$\bar{\sigma} = 0.375 \bar{\epsilon}^{-0.13} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

### 3.2 모델재료실험 결과

플런저에 대한 모델 실험의 예비성형체는 Table 1의 ①의 예비성형체를 기준으로 하고 ②와 ③의 경우는 예비성형체의 형상변수 중에서 높이가 성형성에 큰 영향을 준다는 점을 이용하여 ①의 경우보다 각각 10%씩 높이를 줄이거나 늘려서 결정하였다. 그러나 체적은 모두 동일하게 하였다.

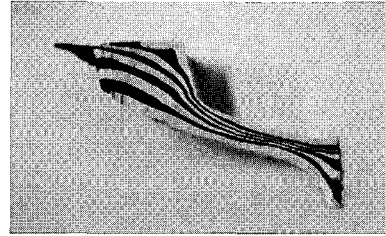


Fig. 4 Deformed shape of the plunger by model test at final step

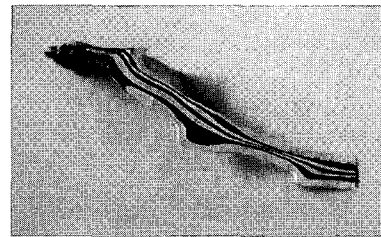


Fig. 5 Deformed shape of the bottom by model test at final step

이 실험의 결과는 압축하는 상부 금형의 압하깊이에 따라 대각선 방향에 대해 정리하였다. Fig. 4는 플런저 모델의 ①의 예비성형체로 실험한 결과로서 성형의 마지막 단계에서 시편의 변형 형상이다. 그림에서 볼 수 있듯이 소재의 유동이 자연스럽게 접히는 현상이나 찢어지는 등의 결함을 보이지 않고 소재가 금형 내부에 충분히 잘 채워지는 것을 알 수 있다. 그리고 플런저의 제일 아래 부분은 압하깊이 80%에서부터 채워지고 있으며 가장 자리는 플래시가 생기면서 모두 채워져서 완전한 형상으로 성형되고 있다. 예비성형체의 형상에 따라서 성형 양상이 조금씩 차이가 있지만 ①의 예비형상이 가장 적합한 것으로 판단된다. 이 예비성형체를 3.3절의 3차원 유한요소해석에서 사용하였다.

하부 모델에 대한 모델 성형성 실험도 플런저와 같은 방식으로 수행하였다. Fig. 5는 ①의 예비성형체로 실험한 결과로 성형의 마지막 단계에서 대각선 방향에서의 시편의 변형 형상이다. 하부금형이 접촉하는 면에서는 돌기와 마찰의 영향 때문에 시편의 두께 중앙에서 변형이 주로 발생하여 층이 얇아짐을 알 수 있다.

### 3.3 3차원 유한요소해석

해석에 사용된 소재는 일반적으로 금형의 재료로 쓰이는 0.12% C를 함유한 강을 사용하였다. 그것의 유동 응력식(flow stress)<sup>7)</sup>은 1200℃ 열간상태의 (5)식을 사용하

**Table 2 Dimensions of the preform for Finite Element analysis (unit : mm)**

Billet No.	Plunger	Bottom
①	260×210×160	255×215×120
②	278×224×140	279×235×100
③	245×198×180	236×199×140

$$\bar{\sigma} = 77.28 \bar{\epsilon}^{-0.131} \text{ (MPa)} \quad (5)$$

었다.

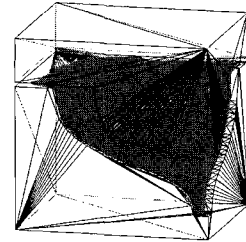
금형과 소재와의 마찰조건은 열간에서 유효하지 않은 상태로 보아 마찰 계수 0.6으로 하고 상부 금형의 속도는 해머단조를 고려하여 500mm/sec로 하였다. 금형과 예비성형체의 대칭성을 고려하여 1/4만 해석하였다. 본 연구에서 해석하기 위한 예비성형체의 체적은 실제로 가공 여유와 플래시의 양을 고려하여 실제 제품 체적에 약 8%를 더하여 적용하였다. 해석에 사용된 금형은 강체로 가정하였다. 해석은 등온과 비등온으로 나누어 수행하였으며 예비성형체는 동일한 것을 사용하였고 형상은 Table 2와 같은 치수를 사용하였다.

### 3.3.1 등온 단조해석

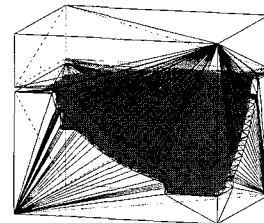
플런저 모델의 총 압하깊이는 216.3mm이고 소재의 절점 수는 1586개이며 요소 수는 6966개의 사면체 요소를 사용하였다. 하부 모델의 총 압하깊이는 181.7mm이고 소재의 총 절점 수는 1296개이며 요소 수는 4361개의 사면체 요소를 사용하였다. 해석의 결과는 압하깊이에 따른 소재의 성형성을 이해하고 단조하중을 파악하는 것을 중심으로 정리하였다.

플런저 모델에 대한 해석결과 최종단계는 Fig. 6과 같다. 그림에서 나타나듯이 소재가 성형이 되면서 금형을 따라 일정하게 채워짐을 알 수 있다. 마지막 단계에서의 플래시의 모양도 각 방향에서 일정한 거리로 형성되어 좋은 성형성을 보였다. 전체적인 변형양상은 플라스틱인 실험결과와 비슷하지만 플런저의 중앙부위는 실험에 비해서 늦게 채워짐을 알 수 있다. 최대 단조 하중은 188MN으로 예측되었다.

하부 모델은 플런저 모델에 비해 압하깊이가 더 작지만 금형의 형상이 복잡한 특징이 있다. 해석의 최종단계의 결과는 Fig. 7과 같다. 성형결과 그림에서 보듯이 소재가 성형이 되면서 특별한 결함이나 문제를 보이지 않고 양호한 성형을 보임을 알 수 있다. 하부 모델의 최대 단조하중은 175MN정도로 예측되었다.



**Fig. 6 Deformed shape of the plunger by isothermal 3D simulation at final step**



**Fig. 7 Deformed shape of the bottom by isothermal 3D simulation at final step**

### 3.3.2 비등온 단조해석

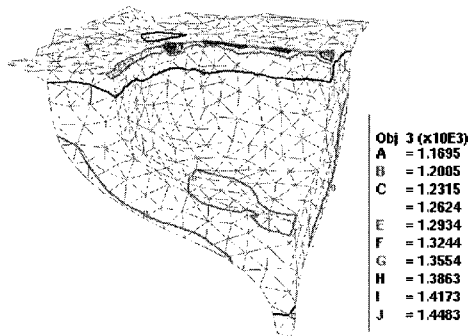
실제의 열간단조 공정에서는 성형이 되면서 소재와 금형 사이에 열전달이 발생한다. 일반적으로 소재의 온도가 많이 떨어지면 금속의 성형성에 영향을 주기 때문에 해석 시에 이를 고려할 필요가 있다. 상부 금형의 속도는 500mm/sec이며 금형과 소재 간의 알려진 열전달계수(heat transfer coefficient)는 7.57 N/sec/mm/°C이다. 그 외의 금형과 소재의 열물성치<sup>(8)</sup>는 Table 3과 같다.

유한요소법을 이용한 비등온 해석의 결과, 플런저 모델은 Fig. 8과 같이 소재 온도가 상승한 부분은 약 1230°C에서 1260°C사이에 분포하였다. 또한 최저온도는 약 1168°C임을 알 수 있다. 그리고 유효변형률과 유효변형률속도가 큰 부분은 소재의 온도가 다른 부분보다 상승했음을 알 수 있었다. 상부 금형의 총 압하 깊이가 216.3mm이고 금형의 압하속도가 500mm/sec임을 감안한다면 금형과 소재의 접촉시간은 약 0.43초 정도이다. 따라서 금형과 소재의 온도가 많이 떨어지지 않았고 소재의 경우 변형량이 많은 일부는 오히려 내부 변형에너지에 의해 온도가 증가한 것으로 나타났다. 또한 비등온 해석의 결과 단조하중은 224.4MN으로 등온 해석의 결과에 비해 약 20% 증가하였다. 이것은 성형도중 소재의 온도가 떨어져 소재의 유동용력이 증가하였기 때문이다.

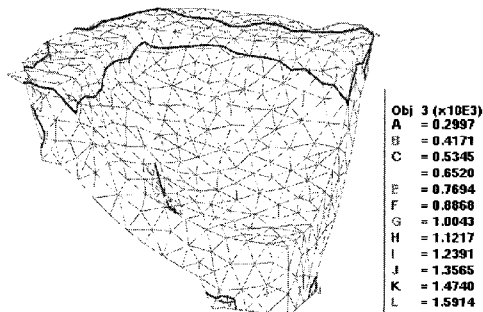
**Table 3 Thermal properties of the die and the preform**

	Die	Preform	Unit
Thermal conductivity	35.3	35.3	N/sec/°C
Heat capacity	3.85	6.11	N/mm/°C
Emissivity	0.7	0.7	-
Initial temperature	300	1200	°C

하부 모델의 비등온 해석의 결과는 플런저 모델과 비슷하였다. 플런저와 비교해서 하부 모델은 압하 길이가 짧아서 상대적으로 소재와의 접촉시간이 약 0.37초 정도로 더 짧았다. Fig. 9와 같이 성형 후 소재 온도가 상승한 부분은 약 1240°C 정도이었고 최저 온도는 약 1174°C로 나타났다. 그리고 해석결과 단조하중은 191.4MN으로 등은 해석의 결과에 비해 약 10%가 상승되었다.



**Fig. 8 Temperature distribution of plunger after non-isothermal forging**



**Fig. 9 Temperature distribution of bottom after non-isothermal forging**

#### 4. 통합 금형의 설계

앞에서 제시한 브라운관용 금형의 제작방식보다 경제성과 생산의 효율을 고려한 금형의 제작방법을 제시하고 그 성형성을 연구하였다. 지금까지 브라운관 제작용 금형은 플런저와 하부 모델의 두 형태를 나누어 제작하였다. 그러나 실제의 제조 공정에서 플런저가 하부 모델에 비해 그 수요가 많고 수명도 짧다. 따라서 브라운관의 크기가 다르지만 금형의 크기가 비슷한 것끼리 묶어 금형을 제작한다면 훨씬 경제적이다. 금형의 크기가 비슷한 17인치 플런저와 19인치 하부 금형의 경우를 적용하여 이 방법을 제시하고자 한다. 또한 하나의 상부 금형으로 마지막까지 성형하는 방법과 평금형을 사용하여 예비성형을 한 후 최종의 금형으로 성형하는 방법을 비교하여 성형성을 높이는 방법을 제시하고자 한다.

예비성형체의 설계는 가공여유와 플래시의 양을 감안한 전체 체적을 기준으로 직육면체의 예비성형체로 결정하였다. 예비성형체의 치수는  $290^H \times 320^W \times 244^L$  mm로 정하였으며 해석조건은 앞의 방법과 동일하게 하였다.

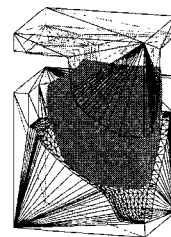
##### 4.1 해석 결과

###### 4.1.1 하나의 상부금형을 사용한 경우

Fig. 10은 상부 금형의 총 압하깊이의 70%일 때의 예비성형체의 성형 모습을 나타낸 것이다. 해석결과는 처음부터 최종의 상부 금형으로 계속 압축하였기 때문에 Fig. 10에서 보듯이 모서리 부분이 먼저 채워져 최종에서는 소재가 접히는 현상이 보였다. 따라서 하나의 상부 금형으로 성형하는 것은 불가능한 것으로 나타났다.

###### 4.1.2 평 금형을 이용하여 2차 단조한 경우

통합 금형의 2차 단조 해석을 위한 유한요소모델은 Fig. 11과 같다. Fig. 12는 최종 단계까지 성형 후의 그림을 나타낸다. 중간단계에서의 성형성은 평 금형을 사용하지 않은 Fig. 10과 비교해서 모서리 부분에서 소재



**Fig. 10 Deformed shape of the preform after single forging using an integrated die at stroke 70%**

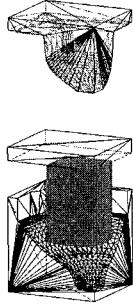


Fig. 11 Finite element model for the 3D simulation of double forging using a plat die

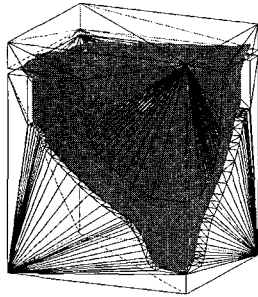


Fig. 12 Deformed shape of the preform after double forging at final step

의 채워짐이 각 방향에 대해 일정하고 성형성도 양호하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 브라운관 제작용 금형을 열간단조로 제작하는 공정을 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실험 해석과 유한요소해석에 의한 결과는 금형의 속도에 관계없이 대체로 잘 일치하였다. 따라서 모델실험은 예비성형체를 예측하고 성형과정에서의 금속의 유동을 파악하거나 하중을 구하는데 이용될 수 있었다.

(2) 비등온 단조해석의 경우 등온단조에 비해서 하중이 플런저와 하부 모델에서 각각 20%와 10%씩 증가하지만 나머지 결과는 유사하게 나타났다.

(3) 모양과 크기가 비슷한 금형을 합하여 동시에 제작

할 수 있도록 제시된 통합 금형의 제작방법은 금형의 제작비와 생산성을 높이는 효과가 있는 것으로 판단된다. 그리고 이 경우 예비성형체와 금형의 모양을 고려하여 2차에 걸쳐 단조 작업하는 것이 성형성이 좋은 것으로 판단된다.

이상의 연구결과를 통해 29인치의 브라운관 금형을 열간단조를 이용하여 금형을 제작하는 방법을 제시하였으며 단조에 필요한 예비성형체의 형상과 단조하중을 예측할 수 있었다. 또한 금형 제조원가를 절감할 수 있는 통합 금형의 형태를 제시하였다.

### 참고 문헌

- (1) DEFORM 2D & 3D manual, SFTC.
- (2) K. Chijiwa, Y. Hatamura and N. Hasegawa, 1981, "Characteristics of plasticine used in the simulation of slabs in rolling and continuous casting", Trans. Iron and Steel Institute of Japan, Vol 21, pp. 178~186.
- (3) J. H. Yoon and D. Y. Yang, 1988, "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, pp. 887~894.
- (4) Kotaro Yagishita, Hidehiko Tsukamoto etc, 1974, "A Study of Simulative Model Test for Metal Forming Using Plasticine", MTB91 July.
- (5) 김범수, 배원병, 정해도, 1999, "금속분말 혼합수지를 이용한 쾌속 형제작에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제16권, 제6호, pp. 36~44.
- (6) 박근, 신민철, 양동열, 조종래, 김중수, 1995, "모델재료와 SLA 시금형을 이용한 터빈 블레이드 열간단조 공정의 모사실험", 한국소성가공학회 논문집, 제4권 제4호, pp. 335~344.
- (7) T. Altan, S. I. Oh, H. L. Gegal, 1982, "Metal forming fundamentals and Applications", ASM, pp. 56~72.
- (8) E. A. Brandes, G. B. Brook, 1992, "Smithells Metals Reference Book", Butterworth-Heinemann Ltd, 7th ed., Chapter 14.