

A Study on Internal Void Closure in Slab Ingot during Hot Free Forging

Jong - Rae Cho*, Young - Deak Kim**

*Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime University

**Korea Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

Abstract

In order to investigate the effect of pre-cooling ingot and void closure in hot plate forging, the internal strain and stress distributions are examined quantitatively by using ABAQUS. Simulations are carried out on a large slab ingot having the same temperature and the temperature gradient brought by air-cooling. It is shown that pre-cooling produces little effect on the strain behavior but remarkable effect on the hydrostatic stress at the central zone of ingot. The main factor crushing of micro void are the effective strain and the time integral of hydrostatic stress in the region surrounding the void. Using regression analysis, it is found that the distortion of void is expressed as a polynomial function of the two factors.

Key Words : Hot Plate Forging, Slab Ingot, Void Closure, Temperature Gradient, Effective Strain, Hydrostatic Stress, Regression Analysis

1. 서 론

발전설비로 사용되는 증기발생기의 튜브시트(tubesheet)나 대형 금형강 등은 판재강괴(slab ingot)를 이용하거나, 원형강괴에서 판재형상으로 초기단조를 한 후 자유단조공정을 거쳐 원형평판과 사각평판을 만든다. 열간 자유단조공정은 대형강괴의 내부에 발생하기 쉬운 주조조직을 없애고 내부의 기공을 압착시키며 강괴내부에까지 단조성을 부여하는 역할을 한다. 자유단조작업에서 단조효과 및 기공압착에 영향을 미치는 인자들로써 유효변형률과 정수압응력의 시간적분값 등이 있는데, 이들은 다이의 형상, 다이폭비(die width ratio), 압하깊이(height reduction), 압하순서(reduction sequence) 등을 어떻게 선택하는가에 따라서 큰 영향을 받는다. 따라서 공정 분석을 위한 체계적인

연구가 필요하며, 그 연구 방법의 하나로 수치해석 기법이 널리 사용되고 있다. 수치해석기법의 하나인 유한요소법을 이용하여 Tanaka등[1]은 평다이를 사용하는 자유 단조 공정에서 기공 압착에 대해서 연구하였고, 축대칭과 평면변형문제[2]에서 기공압착에 관련되는 인자를 유효변형률과 정수압응력의 적분값으로 규명하였다. 그러나 Tanaka등은 평면변형의 해석조건으로 강괴내부의 여러위치에 대한 해석 데이터만을 취하였고 단조효과에 큰 영향을 줄 수 있는 다이폭비 변화에 대한 해석에는 없는 상황이다. Kiefer와 Shah[3]은 평다리로 사각 강괴를 단조할 때 다이폭비와 압하 깊이에 대한 영향을 분석하였고, Dudra와 IM[4]은 평면변형 문제에서 기공의 거동을 에너지와 연관하여 연구하였으며, Hung과 Kobayashi[5]는 원형 강괴의 단조 공정설계에 대해서 연구한 바 있다. 최

근에 Cho와 Yang등[6]은 열점소성 유한요소해석 프로그램을 개발하여 대형 원형강괴의 코깅(cogging) 작업시 공정 변수인 다이 형상, 다이폭비, 온도 구배 및 압하량 등의 영향을 분석하고 적정 단조 조건을 제시하였다. 또한 Park등[7]은 기공이 완전히 폐쇄한 후 압착조건을 규명하는데 초점을 두었으며, Cho등[8]은 평다이의 평판단조, 원형 및 각재 단조를 해석하여 단조효과를 평가하였고 단조성을 평가하는 척도로서 평균유효변형을 개념을 도입하였다. 단조효과에 영향을 주는 인자들로 는 위에서 언급한 인자들 외에 강괴표면과 내부간의 온도구배를 두어 단조효과를 높이는 방법을 해석하였다[9]. 본 연구에서는 기공발생이 주로 발생 하기 쉬운 강괴중심 내부에 대해서 ABAQUS[10] 를 이용하여 다이폭비, 압하깊이 및 공냉유.무 등 공정변수 변화에 따른 영향 및 거동을 분석 하였다. 기공압착에 영향을 주는 인자로 유효변형률과 정수압응력의 시간적분 개념을 이용하였으며 공 정변수에 따른 해석결과들에 대해 회귀분석식을 구하였다. 이 회귀분석식에서 실제 기공압착 정도 를 만족할 수 있는 유효변형률과 정수압응력의 시 간적분값과 관계를 갖는 등고선을 구하여 기공압착 을 위한 정량적인 평가 및 해석이 가능함을 보였다.

2. 해석방법

2.1 해석모델 및 관련수식

후판의 열간 단조공정 해석을 위한 해석대상의 개략도를 Fig. 1에 나타내었는데 다이는 상하부가 모두 평면인 전형적인 상하 평다이를 사용한다. 상부다이의 폭(W)은 작업시 다이의 양쪽 모서리에서 소재의 접힘을 방지하기 위해 다이의 양쪽 끝부분에 R=60mm인 모서리를 두었다. 소재의 높이 (Ho)는 1160mm이고 다이폭(W)과 압하깊이에 따른 높이감소율(HR) 변화에 따른 영향을 평가하기 위해 다음과 같이 여러 경우에 대해 해석하였으며, 특히 열간단조에서 인위적인 표면 냉각에 따른 단조효과를 평가하기 위해 공냉한 후평판에 대해서도 동일한 해석을 수행하였다. Fig.1에서 계산에 사용된 각각의 치수를 보면

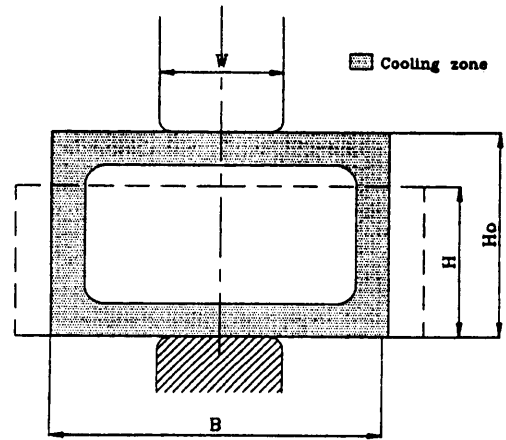


Fig. 1. Schematic diagram of the analysis model

Ho=1160mm, B=1800mm,
W=500, 700, 900, 1100mm,
W/Ho=0.43, 0.60, 0.78, 0.95이고

압하깊이 변화는 HR=6, 9, 12%로서 $HR=(Ho - H)/Ho \times 100$ 으로 정의하였다.

소재의 변형저항은 변형률속도 의존식인 식(1)의 형태로 주어지며 900℃~1220℃사이의 온도함수값으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{\sigma} = C\dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 은 변형저항[Mpa], C는 상수[Mpa], $\dot{\epsilon}$ 는 변형률속도[sec⁻¹], m은 변형률속도 의존지수이다. 식(1)에서 C와 m은 온도의존형 함수로서 다음의 식(2), (3)의 형태로 적용[9] 되었다.

$$C = 0.98(A_0 + A_1T + A_2T^2) \quad (2)$$

$$m = (B_0 + B_1T + B_2T^2)/100 \quad (3)$$

여기서, 소재가 3.5% Ni - Cr - V강의 경우에 계수들의 값은 A₀=1445.74, A₁=-2.117, A₂=0.0008, B₀=-53.91, B₁=0.102, B₂=-0.335×10⁻⁴이다. ABAQUS 프로그램에서는 식(4)의 모델을 사용하고 있기 때문에 식(1)을 식(4)로 모델링하여 계산을 수행하였다.

$$\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} = (1 + B\dot{\epsilon}^m) \quad (4)$$

여기서, σ_0 와 B는 식(1)을 식(4)로 변환하면서 나타나는 상수값을 의미한다.

2. 2 해석조건 및 해석방법

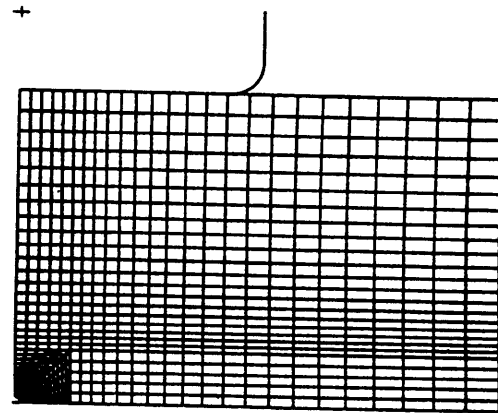
등온해석에서는 다음과 같은 1150° C의 유동응력이 사용되었다.

$$\bar{\sigma} = 17.01e^{-0.136} \text{ MPa} \quad (5)$$

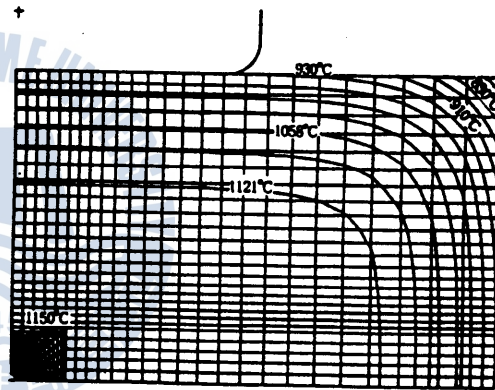
기공에 있어서 실제 상황과 같이 아주 작게 모델링할 경우 낮은 압하율에서도 쉽게 소멸해 버리므로 기공의 거동을 살펴볼 수가 없기 때문에 반경 10mm로 모델링하였다. 이 경우 기공의 거동은 쉽게 관찰할 수 있지만 기공 주위의 변형양상은 실제와 차이가 있으므로 기공이 없는 모델을 사용하여 동일 위치점에서의 $\bar{\epsilon}$ 와 σ_m 값을 구하고 기공단면감소율(ϕ)과의 관계를 해석하였다. Fig. 2(a)는 소재의 대칭성을 고려하여 1/4면만을 모델링한 초기격자를 나타내고 있으며, 다이의 길이(2200 mm)에 비해서 다이폭이 적기 때문에 2차원 평면변형(plane strain)상태로 해석할 수 있다. Fig. 2(b)는 강괴중심에 기공이 있는 경우에 초기 1150° C의 소재를 대기 온도 20℃인 공기중에 45분동안 냉각시킬때 소재 표면과 내부사이에 발생하는 온도구배를 보여주고 있으며, 이때 표면온도가 약 930℃까지 냉각되었음을 보여주고 있다. 이때의 전열계수는 복사 열전달량에 해당하는 등가전열계수($h_{\infty} = 45 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)를 평균적으로 사용하였다. 그러나, 정확한 전열계수값은 향후 실험을 통하여 구할 예정이다.

2. 3 기공압착을 지배하는 인자

유한요소법의 해석결과로 구해진 변형율과 응력으로부터 소재 내부에 존재하는 기공의 압착관계를 규명하는 것은 다이설계와 공정설계에 대단히 중요하다. 일반적으로 기공압착에 영향을 주는 인자로 기공 주위의 유효변형율($\bar{\epsilon}$)과 정수압응력의 시간적분값(IGm)이 크게 관련되어 있다고 알려져 있다[2]. 유효변형율은 매 계산단계마다 누적되는 값이지만 정수압응력은 누적되지 않기 때문에 유효변형율과 같이 누적되는 등가응력값이 필요하게 되어 정수압응력의 시간적분값이 다음과 같이 정의되었다.



(a)



(b)

Fig. 2. Initial mesh(a) and initial temperature(b) distribution after 45minutes pre-cooling

$$IGm = \int_0^t (\sigma_m / \bar{\sigma}) dt \quad (6)$$

본 논문에서는 변형율과 응력중 어느 성분이 어떤 경우에 기공압착에 지배적인가 하는 것을 찾기 위해서 다음의 순서에 의해서 기공압착 거동을 평가하였다.

(1) 후판의 중심부에 소재높이의 0.0172배인 반경 10mm의 기공을 인위적으로 만들고 다이폭비, 압하깊이, 공냉유무에 따른 기공압착을 해석한다.

(2) (1)과 동일한 조건으로 기공이 없는 경우를 해석하여 기공주위의 $\bar{\epsilon}$ 와 IGm값과 기공의 거동과의 관계를 분석한다.

(3) 기공압착율을 회귀분석값으로 하고 $\bar{\epsilon}$ 와

IGm의 값을 독립변수로 두어 회귀분석을 통하여 독립변수의 계수를 구하여 관계식을 구한다.

기공의 압착정도는 여러가지 공정변수에 따라 해석을 수행한 후 단면감소율($\phi = A_f/A_0 \times 100$)과 기공의 면적변형율($\epsilon_s = \ln(A_f/A_0)$)로 하였는데 여기서 A_0 는 변형전의 기공단면적, A_f 는 변형후의 기공단면적을 의미하며 $\phi(\%)$ 는 변형 후 남아 있는 기공단면적을 의미한다. 다이폭비, 높이감소율, 공냉유무 등 공정변수의 변화에 따라 해석을 수행한 후 얻어진 데이터로부터 회귀분석을 적용하여 회귀분석값(P)은 다음 식(7)과 같이 3차 다항식으로 유추하였다.

$$P = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^{3-i} A_{ij} \cdot \bar{\epsilon}_i \cdot IG_m^j \quad (7)$$

해석결과로부터 면적변형율(ϵ_s)값의 평가를 위해 데이터값은 기공압착정도에 있어서 초기, 중기, 그리고 거의 완전히 기공압착된 말기부분에서의 데이터값을 취하였다. 해석상 ϵ_s 에 대해 음의 값을 곱한 $-\epsilon_s$ 를 사용하였다.

3. 해석결과 및 검토

3.1 단조공정 해석

Fig. 3은 45분 공냉 후 판재 중심의 수직단면에서의 온도분포를 나타낸 것으로 강괴표면은 약 930°C이며 내부와 표면은 약 190°C의 온도차를

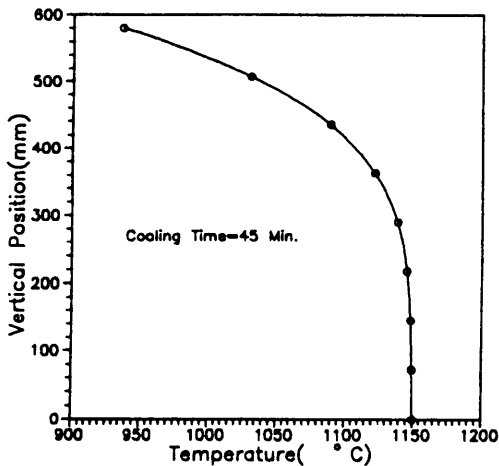


Fig. 3. Temperature distribution in pre-cooled slab ingot during 45minutes

보인다.

Fig. 4는 공냉하지 않고 등온으로 가정한 경우 $W/H=0.78$ 에 $HR=12\%$ 로 압하하였을때 유효변형율을 나타내고 있으며, 중심부에서 약 0.35로 가장 큰 값을 나타낸다. Fig. 5는 $HR=9, 12\%$ 인 경우와 공냉유무 및 다이폭비의 증가에 따른 작업하중 변화를 나타내는 선도이다. 다이폭비가 증가함에 따라 하중은 증가하며 온도구배를 두었을 경우는 두지않은 경우보다 약 2배정도 큰 하중의 증가를 보이고 있다. 반면에 공냉한 경우와 하지않은 경우 모두 $HR=9\%$ 에서 12%로 증가하여도 하중의 증가가 거의 없다.

Fig. 6은 $HR=9\%$ 와 12%인 경우에 중심부에서 다이폭비 변화에 따른 유효변형율과의 관계를 나

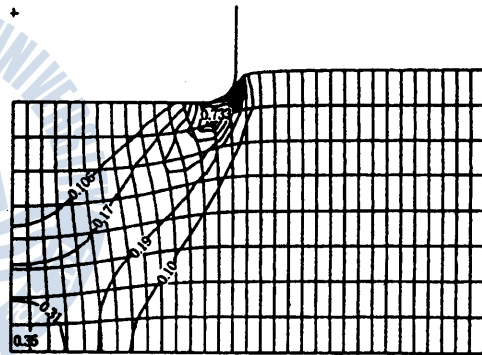


Fig. 4. Distribution of effective strain in uncooled plate forging($W/H=0.78, HR=12\%$)

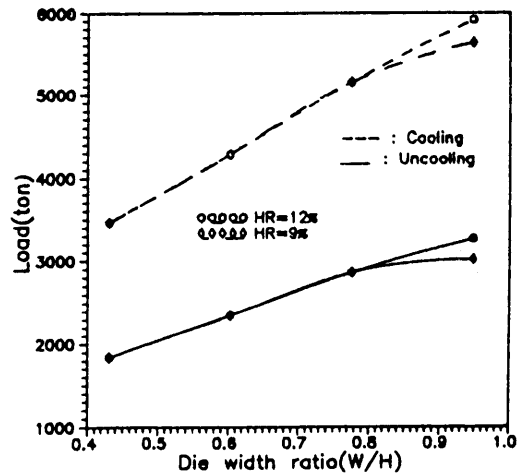


Fig. 5. Relation between die width ratio and load in case of uncooling and cooling

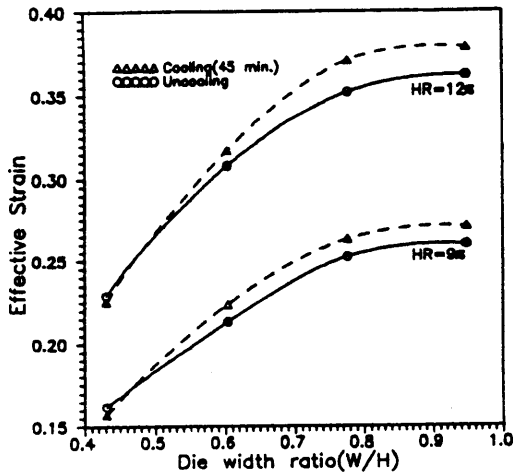


Fig. 6. Relation between die width ratio and effective strain in case of uncooling and cooling

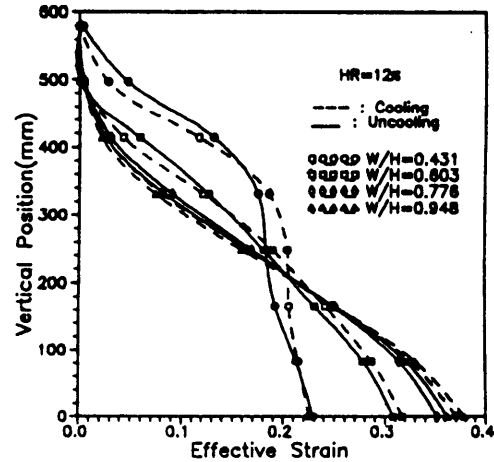


Fig. 8. Effect of die width ratio on equivalent strain distribution in vertical direction

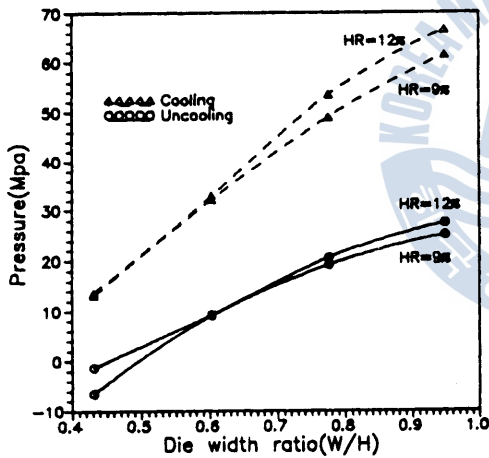


Fig. 7. Relation between die width and pressure in case of uncooling and cooling

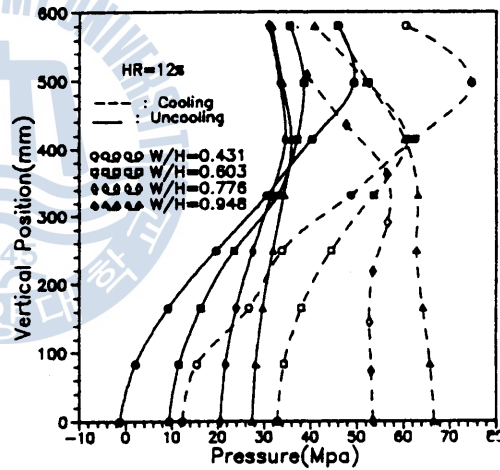


Fig. 9. Effect of die width ratio on pressure distribution in vertical direction

타낸 것이다. 다이폭비가 증가하고 압하량이 증가할수록 $\bar{\epsilon}$ 는 증가하는 경향을 보이고 있는데 공냉을 할 경우와 하지않을 경우 $\bar{\epsilon}$ 값의 증가는 큰 차이를 보이지 않고 있는 반면에 높이감소율과 다이폭비증가에 따라서는 큰 차이를 보이고 있다. 특히 HR=9%에서 12%로 증가시 그 정도가 약 2배정도 커지며 다이폭비가 증가함에 따라 $\bar{\epsilon}$ 도 증가하다가 다이폭비 0.9이상에서부터는 다이폭비가 증가하여도 $\bar{\epsilon}$ 는 더 이상 증가하지 않는 정상상태를 나타내고 있다. 이는 적절한 다이폭비를 선정할 수

있는 기준을 제공하고 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일조건인 경우로 HR=9, 12%에 따른 압력 변화를 보여주고 있다. 이 경우에도 역시 온도구배를 둔 경우가 두지않을 경우보다 약 2배 이상으로 압력이 크게 작용되어짐을 알 수 있는데 온도구배를 두고 압하 할 경우, 소재표면 부위의 냉각된 영역이 중심부에 비해서 유동용력이 크기 때문에 강체영역이 확대되어 소재내부까지 다이압력이 충분히 전달된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 공냉유무에 있어서 HR=12%

이고 다이폭비가 변화할 때 중심에서 강괴표면까지 위치에 따른 유효변형율과 정수압응력을 나타내고 있다. 유효변형율은 강괴의 중심부에서 가장 크게 작용함을 알 수 있으며 표면부위로 갈수록 변형율의 분포는 점차 감소되는데 다이폭비가 클수록 그 경향이 더 크게 나타난다. 정수압응력은 등온의 경우 다이와 소재가 접촉하는 부위가 중심보다 큰 분포를 나타내고 있으며 다이폭비가 적을 경우 그 영향이 뚜렷하지만 온도구배가 있는 경우는 다이폭비가 증가하면 중심부에서 오히려 더 큰 값을 보임을 알 수 있다. $\bar{\epsilon}$ 와 σ_m 의 경향은 공냉한 경우가 하지않은 경우보다 더 큰 값을 나타내고 있는데 유효변형율에 있어서는 큰 차이가 없으나 정수압응력의 경우에 있어서는 그 정도가 약 2배이상 증가한다. 따라서, 더 큰 $\bar{\epsilon}$ 와 σ_m 값을 얻기 위해서는 온도구배를 두고 작업하는것이 효과적임을 알 수 있다.

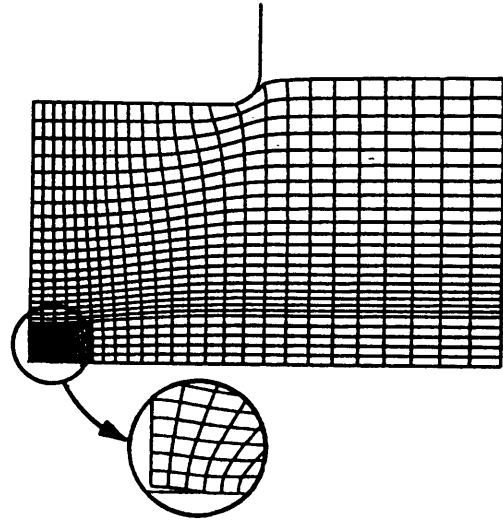


Fig. 10. Deformed geometry of slab ingot with a void(W/H=0.78, HR=9.4%)

3.2 기공압착 거동해석

Fig. 10은 공냉하지 않은 경우로 다이폭비 W/H=0.78에 HR=9.4%로 압하할 경우 강괴 중심내부의 기공이 거의 폐쇄되어져 있는 과정을 확대하여 보여주고 있다.

Fig. 11은 공냉 유무와 압하깊이에 따라 강괴 중심부에 있는 기공의 압착정도를 보여주고 있으며 소재에 있어서 다이로의 열전달은 고려하지 않았다. 각 경우에 있어 다이폭비가 증가하면 기공압착 정도는 증가하지만 W/H=0.9이상 이 되면 오히려 더이상 증가하지 않는 양상을 보이며 공냉을 통해 온도구배가 존재할 경우 기공압착효과는 등온단조에 비해 약 2~3배정도 뚜렷하게 증진됨을 보여 준다. 따라서 중심내부 기공압착효과의 극대화를 위해서는 광폭다이를 사용하고 온도구배를 두어 작업을 수행하는것이 기공압착을 위해 유리함을 알 수 있다.

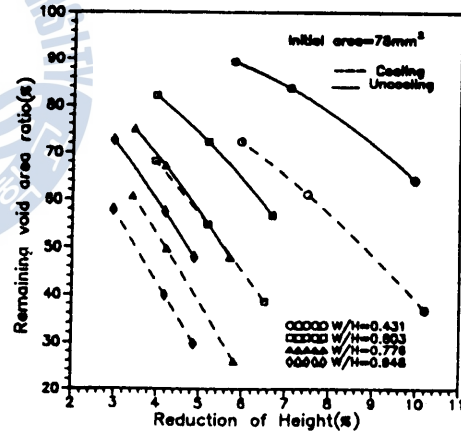


Fig. 11. Relation between reduction of height and remaining void area ratio in case of uncooling and cooling

기공압착의 해석시에는 유효변형율, 정수압응력 및 정수압응력의 적분값이 각각 기공의 압착에 어떤 영향을 주고 있는지를 평가하는것이 중요하다. Fig. 12에서 Fig. 14는 공냉을 하지 않은 경우, Fig. 15에서 Fig. 17은 공냉을 한 경우에 해석한 결과 선도이다. Fig. 12와 Fig. 15는 거의 동일한 높

이감소율에 다이폭비가 변하는 경우 $\bar{\epsilon}$ 와 기공면적 변형율을 표현하였다. 공냉한 경우가 하지 않은 경우보다도 더 큰 영향을 주고 있으며 유효변형율 증가에 따라서 기공압착이 많이 되는 일정한 경향을 볼 수 있기때문에 회귀 분석이 가능하다. W/H가 0.776이고 $\bar{\epsilon}$ 가 0.16인 경우에 등온단조일 때는 $\phi=48\%$ 이고, 냉각했을때는 $\phi=25\%$ 로 나타나고 있으므로 공냉에 따른 기공압착 효과가 2배 정도

증가함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8에 나타나듯이 냉각에 따른 $\bar{\epsilon}$ 의 효과는 적기 때문에 유효변형율 외에 정수압응력(ϵ_m)이 기공압착에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 16은 공냉유무에 있어 정수압응력이 기공압착거동에 영향을 미치는 효과를 알아본 선도이다. 이 경우 σ_m 자체의 결과값은 임의 압하 깊이에서의 순간값에 해당되는 것으로 σ_m 에 대한 경향이 나타나지 않기 때문에 기공압착효과에 대한 기여도를 평가하기가 곤란하다. 따라서 2.3

절에서 정수압응력이 압하 시간 동안에 누적되는 IGm값이 정의 되었으며, Fig. 14와 Fig. 17에서 나타나 있다. IGm값이 증가함에 따라 압착된 기공 단면적은 점차 줄어드는 경향을 보이고 있다. 따라서 기공압착의 독립변수로 $\bar{\epsilon}$ 와 IGm을 이용하여 회귀분석을 하였다.

3.3 회귀분석 적용

Fig. 18은 공냉유무에 대해 다이폭비가 변화할 때 기공이 있는 곳의 평균유효변형율과 정수압응

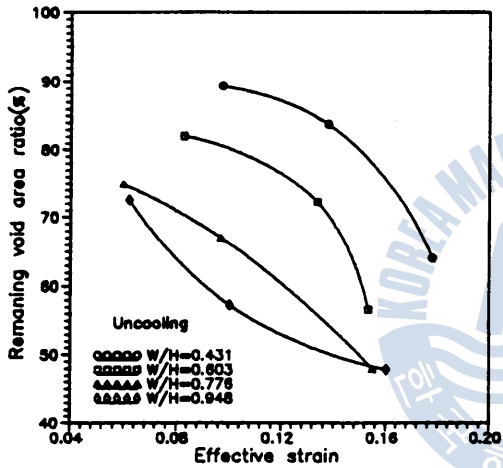


Fig. 12. Relation between reduction of height and remaining void area ratio in uncooled case

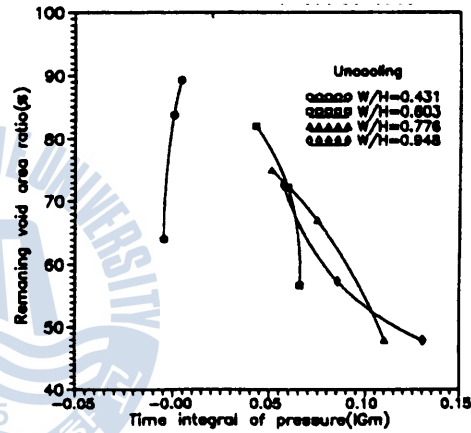


Fig. 14. Relation between time integral of pressure and remaining void area ratio in uncooled case

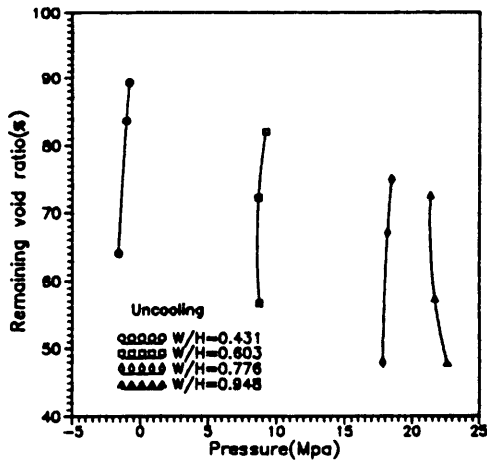


Fig. 13. Relation between pressure and remaining void area ratio in uncooled case

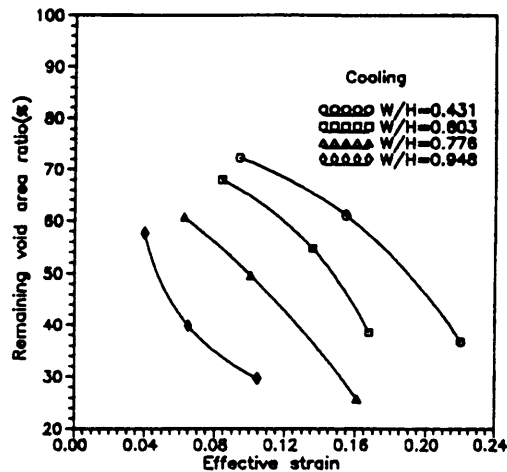


Fig. 15. Relation between reduction of height and remaining void area ratio in cooled case

력의 시간적분값 사이의 $\bar{\epsilon}$ -IGm 관계를 보여주는 선도이다. 기공의 압착정도가 초기단계, 중간단계 그리고 기공이 닫혀지기 전의 단계로 잡아 그때의 $\bar{\epsilon}$ 와 IGm값 그리고 면적변형률값에 음(-)의 값을 취하여 이에 대해 회귀분석하였다. 이산적인 데이터를 얻었을때 이러한 각 데이터들의 정보를 최대한 반영하는 최적의 곡선맞춤(curve fitting)으로 회귀분석을 적용[11]하였는데 본 단조공정 해석에서는 다음과 같은 순서로 적용하였다.

1) 해석대상을 결정한다.

2) 단조조건을 부여하고 해석한다.

3) 기공압착에 영향을 주는 인자로 $\bar{\epsilon}$ 와 IGm개념을 적용하고 목적하는 값은 기공압착 면적변형률로 잡는다.

4) 공정변수 조건에따라 계산을 한 후 원하는 데이터를 구한다.

5) 회귀분석을 적용한다.

6) 확인 및 검토한다.

본 연구에서는 여러가지 공정변수중 공냉한 경우와 공냉하지 않은 경우를 함께 고려하여 해석하

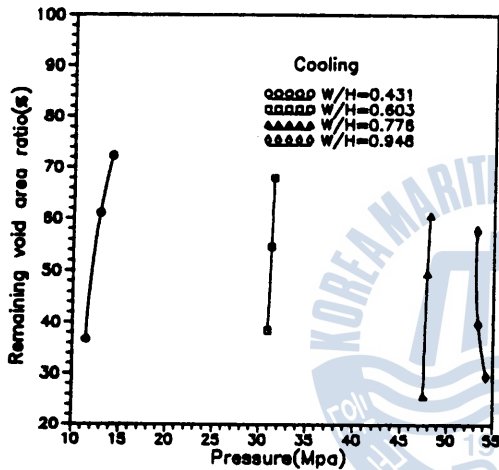


Fig. 16. Relation between pressure and remaining void area ratio in cooled case

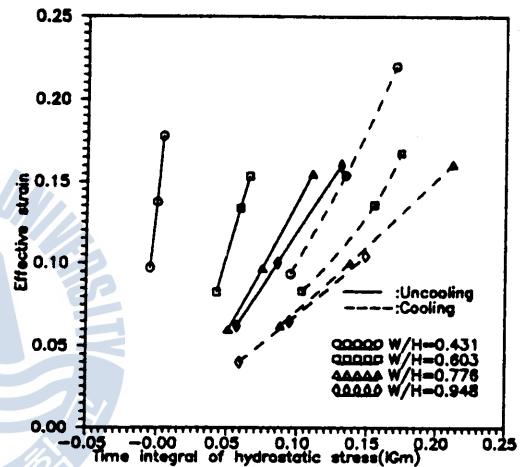


Fig. 18. Relation between time integral of hydrostatic stress and remaining void area ratio

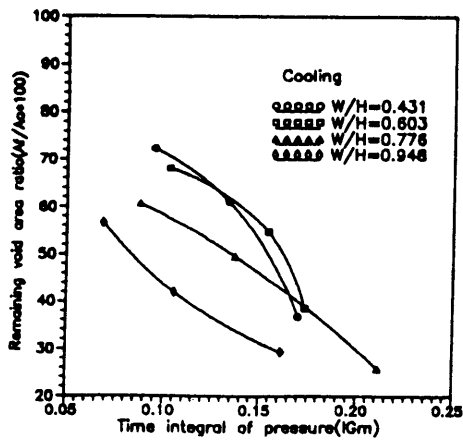


Fig. 17. Relation between time integral of pressure and remaining void area ratio in cooled case

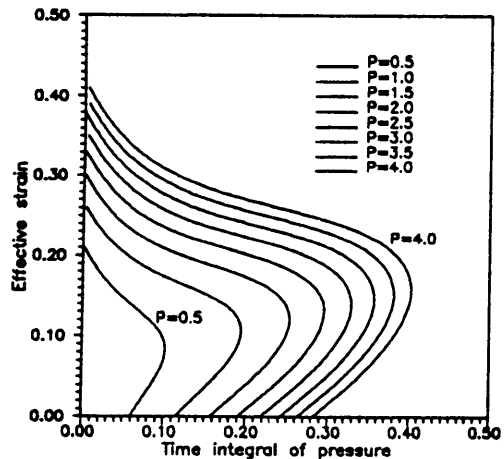


Fig. 19. Influence of time integral of hydrostatic stress and effective strain on void crushing parameter in uncooled and cooled case

Table 1. Regression analysis in uncooled and cooled case

Factor	$-\epsilon_s$	$\bar{\epsilon}$	IG_m	$\bar{\epsilon}^2$	IG_m^2	$\bar{\epsilon} \cdot IG_m$	$\bar{\epsilon}^3$	$\bar{\epsilon}^2 \cdot IG_m$	$\bar{\epsilon} \cdot IG_m^2$	IG_m^3	Correlation coefficients
Case 1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.950
Case 2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.944

Table 2. Coefficients A_{ij} for equation(7) uncooled and cooled case

i \ j	0	1	2	3
0	0.697×10^{-1}	0.693×10^1	-	0.572×10^2
1	-0.569×10^0	-0.550×10^2	-0.216×10^3	
2		0.423×10^3		
3	0.889×10^2			

였다. Table 1은 실제 회귀분석에 사용된 수열의 항과 그때의 상관계수(correlation coefficient)값을 보여준다. 완벽한 피팅일 경우 상관계수값은 1이다. 여기서는 case 2의 경우를 선정하였는데 그 값은 0.944로 높은값을 얻었다. Table 2는 회귀분석을 하는데 있어서 Table 1의 인자($\bar{\epsilon}$, IG_m)중 $\bar{\epsilon}^2$ 과 IG_m^2 항을 제외하였을때 식 (7)의 A_{ij} 값을 나타낸 것이다.

Fig. 19는 회귀분석하여 얻어진 Table 2의 계수값을 가지고 식(7)에 대한 유효변형률과 정수압응력의 적분값과의 등고선도를 보여주고 있다. P는 기공의 면적변형률($-\epsilon_s$)값을 의미하는데 IG_m 과 $\bar{\epsilon}$ 값중 어느 한 값이 일정하더라도 그 중 다른 값의 변화를 통해 원하는 기공압착효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. $\bar{\epsilon}$ 의 값이 일정할 때 IG_m 값이 증가하면 기공압착율은 증가하며 마찬가지로 IG_m 값이 일정하고 $\bar{\epsilon}$ 가 증가하여도 기공압착정도는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나, $\bar{\epsilon}$ 가 적은 영역에서는 IG_m 이 일정하고 $\bar{\epsilon}$ 가 증가할때 오히려 압착효과는 감소함을 알 수 있다. 따라서 두 인자값의 적당한 조절방법을 통하여 원하는 기공압착효과를 얻을 수 있다. 이처럼 기공압착효과에 해당하는 $\bar{\epsilon}$ 와 IG_m 값의 정량적인 수치값 예측이 가능함을 보여주고 있다.

4. 결 론

평다이를 사용하는 평판단조에서 다이폭비, 압하깊이 및 강괴의 공냉 유무에 따라 변형률과 응력

을 계산하였으며, 강괴의 중심에 기공을 모델링하여 기공의 압착에 영향을 미치는 인자를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 강괴의 중심에서 높이 방향의 유효변형률과 정수압응력의 분포를 계산하였다. 강괴에 온도구배가 있을 경우에 등온단조에 비해 유효변형률의 변화는 적지만, 정수압응력은 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 다이폭비가 0.9이상에서는 단조효과가 증가하지 않는다.
- (3) 기공폐쇄를 지배하는 인자로 유효변형률과 정수압응력의 시간적분값을 사용하였으며, 기공압착의 정도를 평가하는 회귀분석식을 구하였다. 그러나 기공이 완전히 압착해 표면이 접착되는 과정의 해석을 위해서는 금속간의 결합에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) Tanaka, M., Ono, S., Tsuneno, M., and Iwadate, T., 1987, "An Analysis of Void Crushing during Flat Die Free Forging," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 11, pp. 1035 - 1042.
- 2) Tanaka, M., Ono, S. and Tsuneno, M., 1986, "Factors contributing to crushing of voids during forging", Journal of the TSTP, Vol. 27, No. 306, pp. 852 - 859.
- 3) Kiefer, B. V. and Shah, K. N., 1990, "Three-dimensional simulation of open-die press forging", Trans. ASME, J. Engng Mater. Technol.,

- Vol. 112, pp. 477 - 485.
- 4) Dudra, S. P. and IM, Y. T., 1990, "Analysis of void closure in open - die forging", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 30, No. 1, pp. 65 - 75.
 - 5) Hung. C., and Kobayashi. S., 1992, "Three - Dimensional Finite Element Analysis on Open - Die Block Forging Design", *J. of Engng for Industry*, November, Vol. 114., pp. 459 - 464
 - 6) Cho, J. R., and Park, C. Y., and Yang, D. Y., 1992, "Investigation of the cogging process by three - dimensional thermo - viscoplastic finite element analysis", *Proc Instn Mesh Engrs*, Vol 206, pp. 277 - 286
 - 7) 박치용, 양동열, 조종래, 1993, "대형강괴 단조에서의 내부기공 압착조건 규명 및 결 합강도 예측", *대한기계학회 '93 추계학술대회 논문집(I)*, pp. 562 - 566.
 - 8) 조종래, 김동권, 이부운, 양동열, 1995, "평다이를 사용하는 자유단조 공정의 최적 단조 조건에 관한 연구", *한국소성학회지* 제4권 제2호, pp. 11~15.
 - 9) Ono, S., Minami, K., Murai, E. and Iwadate, T., 1994, "Three - dimensional simulation on the internal void closure in a ultra large ingot using a pre - cooling ingot forging process", *Journal of the JSTP*, Vol. 35, No. 405, pp. 1201~1206.
 - 10) ABAQUS Version 5.4, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
 - 11) Kuester, J.L. and Mize, J.H., 1973, "Optimization techniques", chapter. 6, pp. 203~217.

