

대형 강괴의 코깅공정 해석 및 개선에 관한 연구

조 종래, 박 치용, 양 동열, 김 동진,* 박 일수*

한국과학기술원 생산공학과

* 한국중공업 기술연구소, 주단기술부

대형 강괴의 자유단조 공정 중에서 코깅(cogging)작업은 강괴 단조의 초기에 단면을 줄이면서 길이 방향으로 늘리는 작업이다. 코깅 작업의 역할은 주조시 발생하는 강괴 내부의 기공을 압착시켜 제거하며 주조 조직을 파괴하여 물성치를 균질화하고 향상시키는 것이다. 그러나 대형강괴의 작업에는 제약조건이 많이 있고 작업공정에서 공정변수도 여러가지 이다. 따라서 본 논문에서는 변형해석과 온도해석을 할 수 있는 3차원 열-점소성 유한요소해석 프로그램을 개발하고, 코깅공정에서 다이의 형상과 다이폭, 다이 겹침과 엇갈리기, 강괴의 온도 구배, 압하 깊이와 패스 설계등의 여러 공정 변수의 영향을 해석하여, 단조 효과를 최대화하는 최적의 단조 공정을 예측하여 공정개선에 적용하는 것이 목적이다.

1. 서 론

본 연구의 수행 동기와 배경 및 현재까지의 국내의 연구 현황등은 바로 앞의 논문 "대형 강괴의 업셋팅 공정시 기공 압착에 관한 연구"⁽¹⁾에서 자세히 설명되어 있기 때문에 이 논문에서는 생략하였다. 또한 본 연구에서 사용한 열-점소성 유한요소 해석의 이론 및 수식화도 앞 논문에 잘 나타나 있다.

본 연구는 코깅의 변형해석 및 온도해석을 비연계 방식(decoupled)⁽²⁾으로 동시에 해석하여 실제 공정에 가깝게 접근하는 3차원 열-점소성 유한요소 프로그램을 개발하며, 시뮬레이션에 의해 공정을 해석하여 불량 감소 및 원가 절감을 위한 최적의 단조 공정을 제안하고 단조 공정을 개선 하는데 중점을 두었다.

2. 코깅 공정해석

2.1 코깅 공정

코깅작업은 대형단조에서 일반적으로 단조초기의 중요한 작업으로 강괴의 모양을 원형과 사각형 및 팔각형등으로 만들어 단면을 줄이면서 길이 방향으로 강괴를 늘리는 작업이다. 대형 강괴의 경우 강괴의 내부에 충분한 단조 효과를 줄 수 있도록 코깅 공정을 제어함으로써 단조 불량을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 코깅해석을 위해서 열-점소성 유한요소 프로그램을 개발하여 완전 3차원 해석을 수행하였으며, 변형해석 및 온도해석(열전달 해석)을 비연계 방식으로 동시에 해석하였다.

코깅 작업의 3차원 시뮬레이션의 목적은 소재 내부의 변형 및 응력해석, 내부 소재의 유동해석, 소재와 금형의 온도 해석, 단조 후의 치수 변화등의 결과를 분석하여 코깅 작업 변수들을 평가하며 공정 개선에

이용하는 것이다. 코킹 공정의 해석에 이용한 공정 변수는 최근에 플라스틱 실험으로 코킹공정을 해석한 Erman 등의 논문⁽³⁾을 기초로 하였다.

2.2 시뮬레이션에 사용한 코킹 작업의 공정 변수

(1) 강괴의 형상과 다이의 형상

일반적으로 강괴의 단면 형상은 원형, 사각형, 팔각형 등이 있지만 주로 원형 단면의 강괴를 사용하고 있으며, 본 계산에서는 그림 1과 같이 직경, 길이가 각각 2800 mm인 강괴를 대상으로 하였다. 이것은 160ton 강괴의 치수와 비슷하며 대칭성 때문에 1/8만 해석하였다. 다이의 형상과 그 치수는 변형 영역(deformation zone)을 결정짓고 금속유동에도 큰 영향을 주며 변형량과 성형하중 및 최종 그레인(grain)크기의 균질성, 내부 기공의 압착에도 큰 영향을 준다. 본 연구에서는 그림 2과 같은 폭 1400mm의 브이 다이(v-die)와 평다이(flat die)를 사용하였다. 첫번째 패스로 400mm(한쪽 200mm) 씩 압하 깊이를 주었을 때와 계속이어서 두번째 패스에서는 강괴를 90° 회전시켜 400mm을 준 후의 결과를 각각 비교하였다.

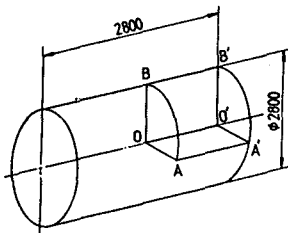


그림 1 계산에 사용된 초기 강괴의 치수

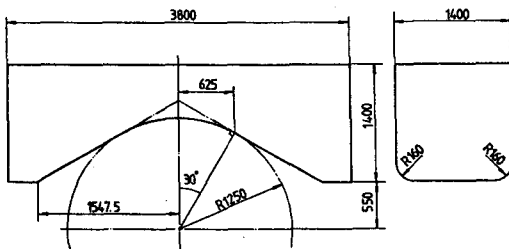


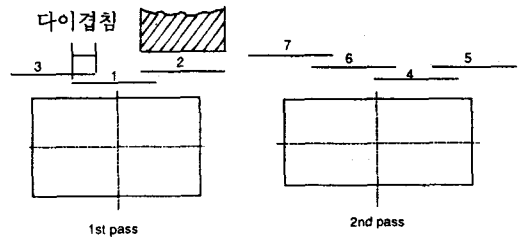
그림 2 브이다이의 형상

(2) 다이 폭 혹은 다이 폭비

다이 폭은 매우 중요한 공정 변수의 하나이고, 특히 강괴의 직경에 대한 다이 폭비(die width ratio, W/H , W =다이폭, H =강괴 직경)가 중요하다. 본 연구에서는 다이 폭을 각각 600($W/H=0.21$), 1000(0.36), 1400(0.5), 1800(0.64), 2200 mm(0.79) 일때의 결과를 비교하였다.

(3) 다이 겹침과 엇갈리기

자유단조 프레스 공정은 강괴의 단면 방향과 길이 방향으로 기공을 압착하고 균일한 조직을 얻는 것이 목적 중 하나이다. 그러나 실제 작업은 불연속적이고 각 패스마다 재료의 유동은 불균일 할 수 밖에 없다. 좀더 균일한 본포를 얻기 위해서는 그림 3과 같은 겹침(die overlapping)과 엇갈리기(die staggering)를 이용하면 변형이력(strain history)이 균일하도록 제어 할 수 있다. 본 연구에서는 엇갈리기는 계산에 도입하지 않았으나 겹침은 다이 폭의 1/2, 1/4을 주어 계산을 수행하여 그 결과를 비교하였다.



(a) 다이겹침(die overlapping) (b) 다이엇갈리기(die staggering)

그림 3 다이겹침과 다이 엇갈리기의 모식도

(4) 강괴의 온도구배

강괴에 온도 구배를 적용하는 원칙은 강괴의 중심부와 표층 사이에 큰 온도 구배를 두어, 표층에서 큰 유동 응력(flow stress)을 발생시켜 변형 저항을 증가시킴으로써 강괴의 내부의 변형을 상대적으로 촉진시키는 것이다. 일반 탄소강이나 합금강의 경우에 1000°C의 유동 응력이 1200°C의 것보다 2배 이상 큼을 알 수 있다⁽⁴⁾. 강괴에 온도 구배를 주는 방법 중의 하나로 본 연구에서는 가열로에서 단조온도까지 강괴를

가열한 후 공냉시키는 방법을 사용하였다.

(5) 압하깊이와 패스 설계

압하깊이(압하량)는 다이 폭과 함께 강괴의 중심부에 변형을 전달시키는 매우 중요한 변수로 압하깊이에 따라서 중심부 변형은 크게 좌우된다. 우선 생각하기에 압하깊이는 클수록 좋을 것 같지만 제품의 균질성, 프레스의 용량, 공정 조건의 제한 때문에 최적의 압하깊이와 그에 따른 패스의 횡수등을 결정해야 한다. 본 연구에서는 직경 2800 mm을 2400mm으로 단조하는 과정에서 압하깊이 400 mm씩 한번 90° 돌려 작업하는 방법과 200 mm씩 2번 돌려 작업하는 방법을 비교하였다. 또 다이 폭과 압하깊이의 영향을 함께 보기 위하여 다이 폭이 600, 1000, 1400, 1800, 2200 mm일 때 각각의 경우 39.3% (1100 mm)까지 압하깊이를 주면서 비교 검토하였다.

(6) 압하속도

고온 열간단조에서 프레스 램의 압하속도는 변형도율과 직접 관련이 있기 때문에 중요한 변수이다. 변형도율과 속도와의 관계는 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{-dh/h}{dt} = -\frac{v}{h} \quad (1)$$

여기서 v는 속도이고 h는 높이이다. 또한 열간에서 변형도율과 유동응력 사이는 다음과 같이 직접 관련이 있다.

$$\bar{\sigma} = c (\dot{\epsilon})^m \Big|_{\bar{\epsilon}, T} \quad (2)$$

여기서 m은 변형도율의 선시티브티 계수(sensitivity factor)이다. 그러나 일반적으로 유압단조 프레스의 작업속도 범위에서는 압하속도가 압하하중에는 영향이 있지만 금속의 내부 유동에는 영향이 거의 없기 때문에 압하속도는 일정하게 10mm/sec로 두었다.

2.3 코깅 해석의 결과 및 검토

(1) 강괴의 형상과 다이의 형상

먼저 2차원 평면 변형 (plane strain)상태로 가정하여

해석한 경우와 완전 3차원으로 해석한 경우를 비교하여 3차원 해석의 필요성을 검토하였다. 그림 4는 평면 변형 해석과 3차원 해석의 초기 격자를 나타내고 있으며, 그림 5은 400mm (한쪽 200mm) 압하깊이 일때의 변형 양상을 나타낸 것으로 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 그림 6에서 나타나 듯이 강괴의 길이 방향으로 변형이 큼을 알 수 있다. 따라서 평면 변형 상태로 가정한 2차원 해석은 현 강괴의 코깅 해석에서는 타당하지 않음을 알 수 있다.

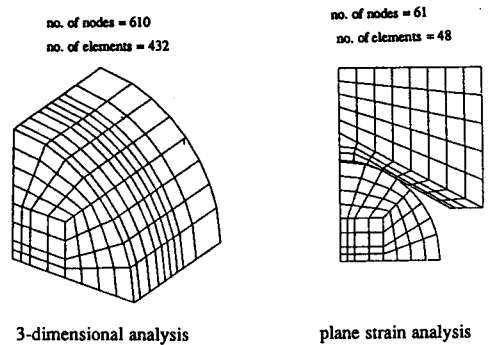


그림 4 계산에 사용된 초기 격자

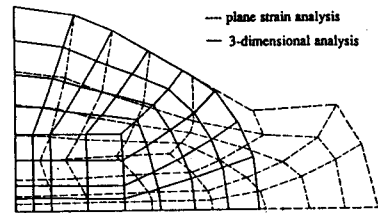


그림 5 400mm 압하깊이에서 단면OAB의 변형 형상

그림 7 과 그림 8은 브이 다이의 경우, 그림 9와 그림 10은 평 다이의 경우 한 패스의 압하깊이가 400mm(한쪽 200mm)일때의 유효 변형을 분포와 정수압응력 분포를 나타내고 있고, 브이 다이의 경우 중심부에 더 단조 효과가 큼을 알 수 있다. 그림 11과 그림 12는 압하 깊이를 400mm씩 강괴를 90° 회전시켜 직경을 2400mm로 만들었을때 브이 다이와 평 다이의 유효변형율을 비교 한 것으로, 브이

다이의 경우에 전체적으로 유효변형율은 크고 중심부에서는 2배 가까이 됨을 알 수 있다. 또한 길이 방향으로 변형이 많아 효과적으로 단면을 줄이면서 길이를 늘리고 있다.

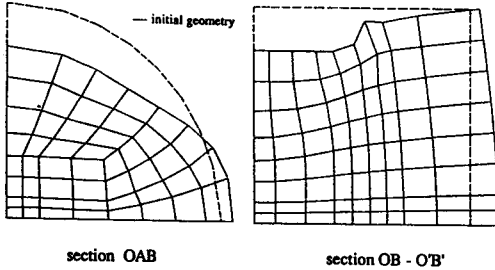
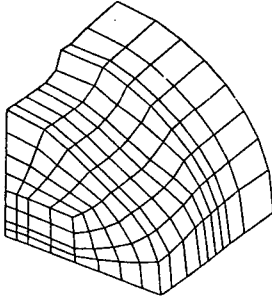


그림 6 브이다이 600mm 압하깊이에서 변형 형상

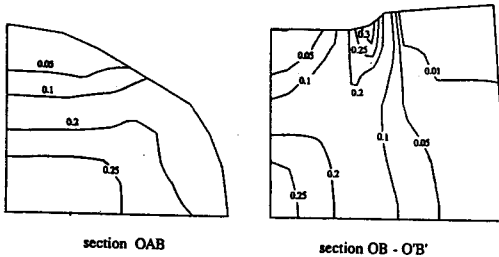


그림 7 브이다이 400mm 압하깊이에서 유효변형율

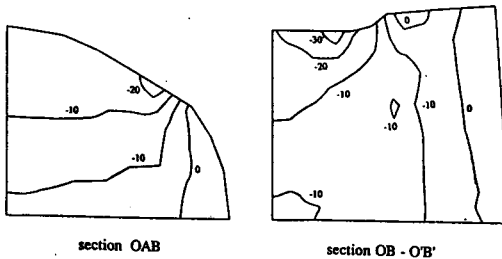


그림 8 브이다이 400mm 압하깊이에서 정수압응력(kg/mm²)

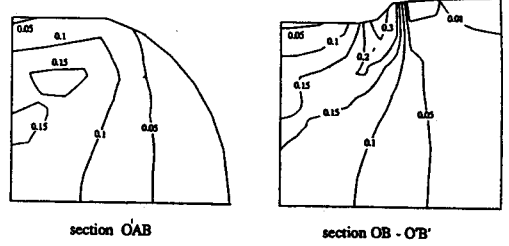


그림 9 평다이 400mm 압하깊이에서 유효변형율

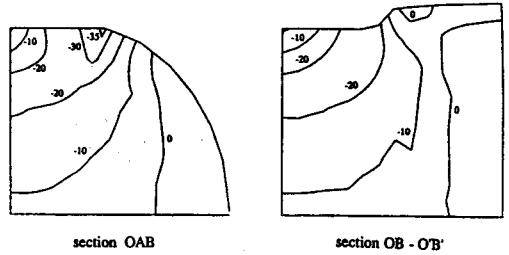


그림 10 평다이 400mm 압하깊이에서 정수압응력(kg/mm²)

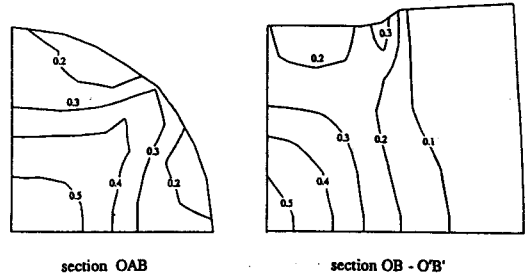


그림 11 90° 회전두번째 패스 후의 유효변형율 분포(브이다이)

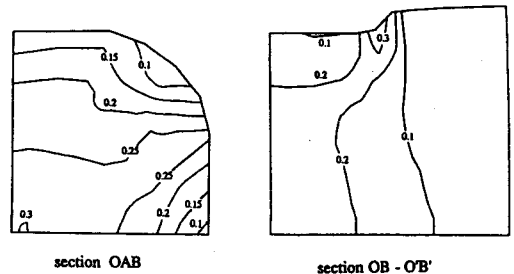


그림 12 90° 회전두번째 패스 후의 유효변형율 분포(평다이)

(2) 다이 폭 혹은 다이 폭비

브이다이와 평다이의 다이 폭비(W/H)가 0.21,

0.36, 0.5, 0.64, 0.79 일때 압하깊이를 39.3 %까지의 결과를 비교 하였다. 그림 13과 그림 14는 브이 다이와 평 다이의 경우, W/H와 압하깊이에 따른 중심부의 유효변형율을 나타낸 것으로 W/H가 0.6 이상에서는 압하깊이에 관계없이 거의 증가하지 않는다.

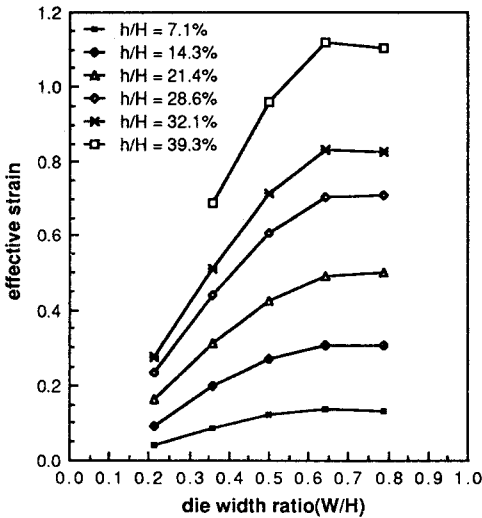


그림 13 중심부 유효변형율에 대한 다이폭 비의 영향(브이다이)

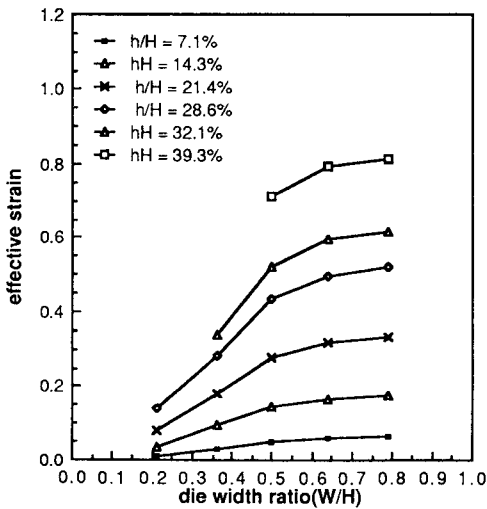


그림 14 중심부 유효변형율에 대한 다이폭 비의 영향(평다이)

그림 15와 그림 16은 W/H와 압하깊이에 따른 중심부의 정수압 응력의 변화를 나타낸 것으로 유효 응력에 대한 비로 표시하였다. 여기서는 정수압 응력도 유효변형율과 마찬가지로 두 변수에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그림 17과 그림 18은 W/H가 0.64와 0.79 일때의 브이 다이와 평 다이의 정수압 응력을 비교한 것으로 압하깊이가 25% 이상에서는 오히려 감소하고 있으며 평다이의 경우 압하깊이가 적을때에는 오히려 인장력이 발생하기도 한다. 그림 19는 다이폭에 따른 하중의 증가를 폭 1400 mm 인 브이 다이를 기준으로 비교하였다. 하중은 다이 W/H에 비례하여 증가하는 것이 아니라 그 증가율이 낮게 나타나며 브이 다이가 평다이보다 30% 정도 하중이 높다.

이상을 종합하여 볼때 평 다이보다 브이 다이가 코킹 작업에는 유리하며, W/H가 0.5 이하에서는 압축력이 적거나 인장력이 작용하므로 바람직하지 않으며 압하 깊이는 20 ~ 25% 가 적당하고 W/H의 영향이 압하깊이의 영향보다 우세함을 알 수 있다.

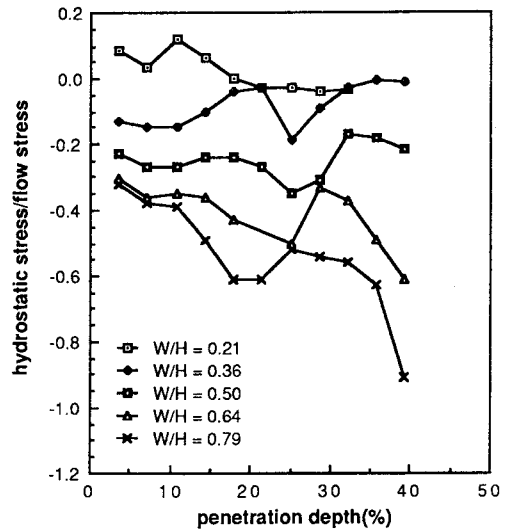


그림 15 중심부 정수압응력에 대한 다이폭 비의 영향(브이다이)

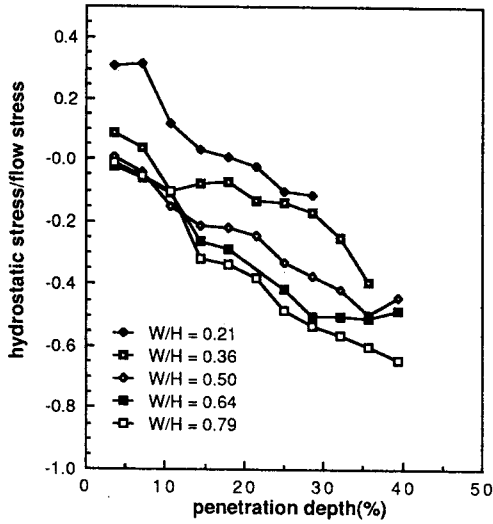


그림 16 중심부 정수압응력에 대한 다이폭 비의 영향(평다이)

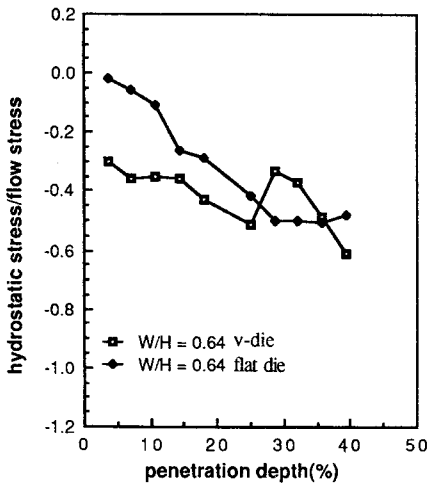


그림 17 W/H=0.64일때 브이다이와 평다이의 정수압응력 비교

(3) 다이 겹침과 엇갈리기

다이 겹침을 많이 하는 것은 다이 폭이 감소하는 효과를 가져오기 때문에 겹침 정도에 따라 다소 차이가 있다. 그림 20 과 그림 21은 다이 겹침이 다이 폭의 각각 1/2과 1/4일때 단면 OB-O'B'의 유효변형률과 정수압응력 분포를 나타낸 것으로 1/4일때

가 다소 높게 나타나지만 큰 차이가 없다. 자유 단조 작업은 겹침 정도에 상관없이 변형이 불균일하게 일어나는 것은 피할 수 없기 때문에 다이 엇갈리기를 병행하는 것이 필요하다. 따라서 작업시간을 단축하고 변형을 균일하게 하기위하여 겹침을 적게하고 엇갈리기를 병행하는 것이 바람직하다.

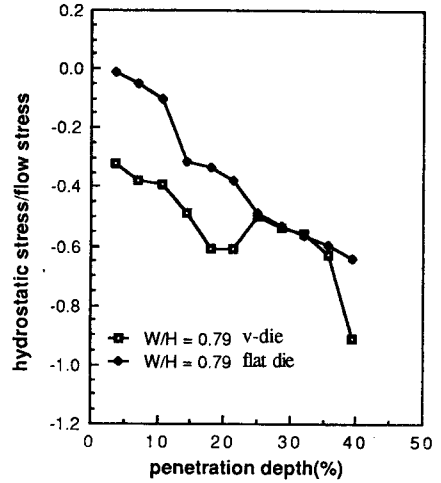


그림 18 W/H=0.79일때 브이다이와 평다이의 정수압응력 비교

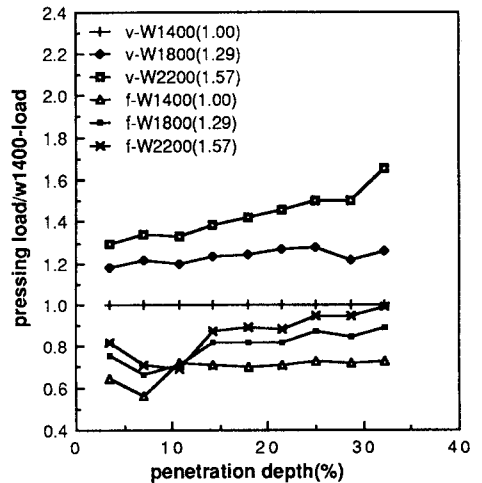


그림 19 브이다이와 평다이의 압하깊이에 대한 하중비교

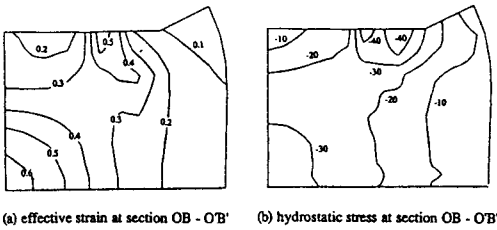


그림 20 90° 회전 후 다이접침이 1/2일때
유효변형률과 정수압응력 분포(브이다이)

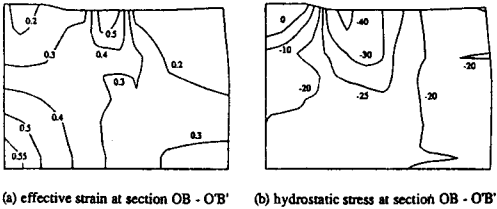


그림 21 90° 회전 후 다이접침이 1/4일때
유효변형률과 정수압응력 분포(브이다이)

(4) 강괴의 온도구배

로에서 1230°C 강괴를 꺼집어 낸 후 20분 정도 공냉하였을때 표면의 온도가 900°C 정도로 내려 갔다. 이 상태에서 작업을 했을때 그림 22와 그림 23의 유효변형률을 그림 7과 그림 8의 온도구배가 없는 경우와 비교하여 보면 중심부에서 유효 변형률을 20% 정도, 정수압 응력은 약 4배 정도 증가함을 알수 있다. 이것은 강괴의 바깥층이 중심부에 비해 변형저항이 높아 다이를 보완해 주는 역할을 하여 기공이 집중되어 있는 중심부에 큰 변형과 압축력을 일으키기 때문에 유리한 조건이다.

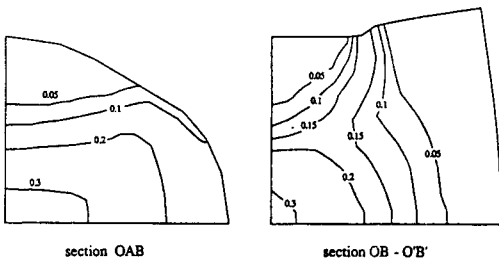


그림 22 20분 냉각 후 400mm 압하 후의 유효변형률

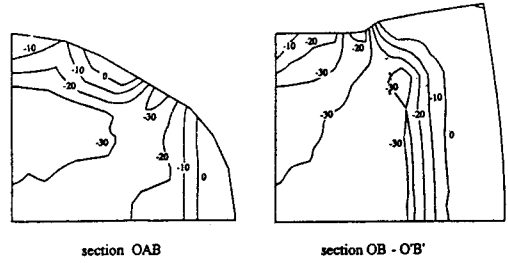


그림 23 20분 냉각 후 400mm 압하 후의 유효변형률

(5) 압하깊이와 패스 설계

그림 24은 압하 깊이를 200mm씩하여 두번 회전 시켜 400mm를 작업한 것으로 한번 돌려 작업한 그림 11의 유효 변형률 분포와는 차이가 거의 없다. 오히려 압하량을 적게하여 여러 패스로 하면 내부 변형이 균일해 지며 표면의 접힘(folding) 현상도 방지 할 수 있다. 그러나 앞에서 W/H와 압하 깊이의 영향 분석에서 나타나듯이 기공을 단조 초기에 압착하고 단조 효과를 중심까지 가하기 위해서는 한 패스에 20~25%의 압하깊이가 적당하고 그에따라 패스 횟수가 결정된다.

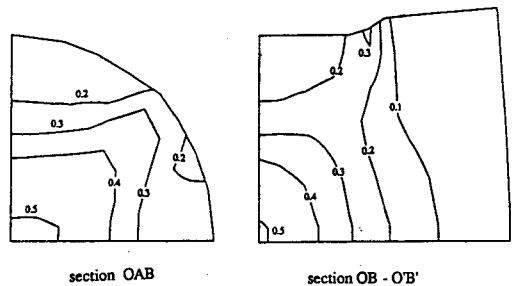


그림 24 압하깊이 200mm씩 두번 회전 후의
유효변형률(브이다이)

3. 결론

대형강괴의 경우 강괴의 중심부에 충분한 단조 효과를 주고 기공을 압착시켜 불량을 줄이고 경제적인 공정 설계를 위하여 공정변수의 영향을 분석하고 공정변수를 효과적으로 제어하는 체계적인 연구를 시작하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 코깁공정 해석을 위한 3차원 열-점소성 유한요소 해석 프로그램 개발하였다.
- (2) 코깁공정 해석은 2차원 평면변형해석으로는 해석의 타당성이 없으며 3차원 해석이 필수적이다.
- (3) 다이의 형상은 브이 다이가 평다이에 비해 효과적이며 다이 폭비(W/H)는 0.6 이상이 좋으며 압하깊이는 20 ~ 25%가 적당하다.
- (4) 다이 걸침은 되도록 적게하면서 다이 엇갈리기를 병행하는 것이 좋다.
- (5) 강괴의 표면을 냉각시켜 온도구배를 허용하는 것이 강괴의 중심부에 큰 변형과 큰 정수압응력을 일으킨다.

본 연구 과제는 한국 중공업(주)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 또한 한국 과학기술 연구원 시스템 공학센터의 Cray 2S를 이용하였다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 박 치용, 조 종래, 양 동열, 김 동진, 박 일수, 대형 강괴의 업셋팅 공정시 기공 압착에 관한 연구, 단조 공정 심포지움, 대한소성가공학회, 1991.
2. 조 종래, 박 치용, 천 명식, 윤 정호, 양 동열, 2차원 열간단조에서의 변형과 온도의 연계해석과 비연계해석 비교, 대한기계학회 논문집, 제14권, 제4호, pp.839, 1990.
3. Erman, E., Medei, N.M., Roesch, A.R. And Shah, D.C., Physical Modeling of Blocking Processes in Open-Die Press Forging, J. of Mech. Working Tech., vol. 19, pp. 165, 1989.
4. Altan, T., Oh, S.I. and Gegel, H.L., Chapter 4: Plastic Deformation, Metal Forming Fundamentals and Application, 1983.