

1.5wt%C 초고탄소 워크롤 제조를 위한 단조 공정 설계: 기공압착 및 접합강도 분석

임형철¹ · 이호원¹ · 김병민² · 강성훈[#]

Process Design for Manufacturing 1.5wt%C Ultrahigh Carbon Workroll: Void Closure Behavior and Bonding Strength

H. C. Lim, H. Lee, B. M. Kim, S. H. Kang

(Received June 19, 2013 / Revised July 12, 2013 / Accepted July 18, 2013)

Abstract

Experiments and numerical simulations of the incremental upsetting test were carried out to investigate void closure behavior and mechanical characteristic of a 1.5wt%C ultra-high carbon steel. The experimental results showed that the voids become quickly smaller as the reduction ratio increases. The simulation results confirmed this behavior and indicated that the voids were completely closed at a reduction ratio of about 40~45% during incremental upsetting. After the completion of the incremental upsetting tests, the process of diffusion bonding was employed to heal the closed voids in the deformed specimens. To check the appropriate temperature for diffusion bonding, deformed specimens were kept at 800, 900, 1000 and 1100°C for an hour. In order to investigate the effect of holding time for diffusion bonding at 1100°C, specimens were kept at 10, 20, 30, 40, 50 and 60minutes in the furnace. A distinction between closed and healed voids was clearly established using microstructural observations. In addition, subsequent tensile tests demonstrated that complete healing of a closed void was achieved for diffusion bonding temperatures in the range 900 ~ 1100°C with a holding time larger than 1 hour.

Key Words : Incremental Upsetting, Diffusion Bonding, Forged Workroll, Void Closure, 1.5wt%C Ultrahigh Carbon Steel, Bonding Temperature, Holding Time

1. 서론

잉고트의 주조과정에서 발생하는 편석 또는 수축 공과 같은 기공은 제품의 결함 및 파손을 초래할 수 있다[1]. 지금까지 많은 연구자들은 이러한 결함을 제거하기 위하여 새롭고 효과적인 단조 공정을 제시하였다[2]. 또한 잉고트와 앤빌의 형상과 크기, 기공의 크기, 정수압 응력, 유효 변형률 등에 따른 기공의 압착 및 접합거동에 대해 연구해왔다[3~10]. 하지만 기존의 연구는 저탄소강을 적용한 기공압착

거동에 대한 해석 및 실험적 연구가 대부분이다.

본 연구에서는 미세조직적으로 건전한 1.5wt%C 초고탄소강 워크롤 제조를 위해서 효율적으로 기공을 압착시킬 수 있는 새로운 단조 공정 안을 제시하고자 한다. 또한 기존 코깅(cogging) 공정에 대한 문제점을 파악하기 위하여 유한요소해석 기법을 적용하였다. 이를 통하여 기존의 코깅 공정에서 내부 기공의 거동을 확인하여 문제점을 제시하였고, 이를 보완하기 위하여 효과적이고 새로운 방법의 단조 공정 설계를 제시하였다. 새로운 방법의 단조 공정은

1. 재료연구소 변형제어연구실

2. 부산대학교 기계공학부

Corresponding Author: Korea Institute of Materials Science, E-mail: kangsh@kims.re.kr

점진 업세팅과 확산접합, 코깅으로 구성되어 있으며 이를 유한요소해석을 통해 공정의 유효성을 판단하였다. 또한 축소 시편을 사용하여 점진 업세팅과 확산접합, 인장시험 및 미세조직 분석을 수행하였다.

2. 코깅 공정

일반적으로 주조 잉고트는 업세팅(upsetting)과 코깅 공정을 통하여 대형 제품으로 제조된다. 잉고트의 주조 시 발생하는 수축공과 같은 결함 또는 대형 워크롤의 단조 공정 중 압탕부와 네크부에 발생하는 결함은 코깅 공정으로 제거될 가능성이 높지 않다고 알려져 있다. 이를 확인하기 위하여 유한요소해석을 통해 코깅 공정 중 내부 기공의 압착 거동을 확인하였다.

Fig. 1은 유한요소해석에 사용된 잉고트의 형상으로 고경비(길이/직경)가 1.24로 직경대비 길이가 작다. FE해석을 통해 단조 공정 시 내부 기공의 압착 거동을 확인하기 위하여, 잉고트 길이대비 50% 길이의 원통형 기공을 잉고트 중심부에 길이 방향으로 평행하게 모델링하였다. 본 연구에서 사용된 잉고트의 고경비는 작기 때문에 업세팅 공정은 생략하였고, Fig. 2와 같이 코깅 공정만으로 워크롤을 성형한다. 코깅 공정은 잉고트를 꼬리부 또는 압탕부에 Manipulator를 이용하여 90°, 45°, 22.5°로 반복적으로 회전하며 실시된다. 연고자 하는 워크롤 단조품의 몸체부와 네크부의 단조비(A_i/A_f)가 각각 2.7S 및 7.6S이다. 여기에서, A_i 및 A_f 는 각각 초기 및 변형 중의 잉고트의 단면적을 의미한다. 또한 ‘S’는 코깅 공정에서 단면적은 감소하고 길이를 증가시키는 작업 기호이다.

Fig. 3은 Fig. 2의 해석 결과로부터 도출된 단조비에 따른 기공 직경비(d_f/d_i)를 나타낸 그래프이다. 여기에서 d_i 및 d_f 는 그래프에 나타내었듯이 각각 초기 및 변형 중의 기공 직경을 의미한다. 그래프에서 알 수 있듯이, 잉고트의 반복적인 회전 때문에 원통형 기공의 직경이 작아지지만 원형단면이 그대로 유지된다. 예를 들어, 2.7S의 단조비에서 직경비가 0.55(Point 1) 및 0.35(Point 2)이고 단면 형상이 원형인 것을 알 수 있다. 따라서 코깅 공정에서는 기공 크기는 작아지지만 연신이 되면서 닫히지 않으며, 상당히 큰 단조비를 부여해야만 기공 압착이 발생할 것으로 판단된다.

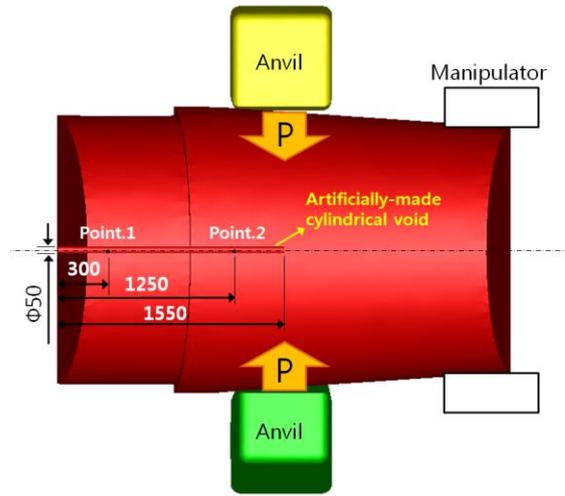


Fig. 1 Ingot model with artificially-made cylindrical void (unit in mm)

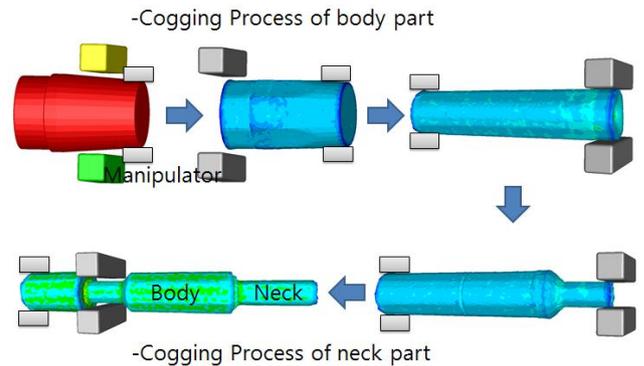


Fig. 2 Manufacturing process for 1.5wt%C ultrahigh carbon workroll using conventional cogging process

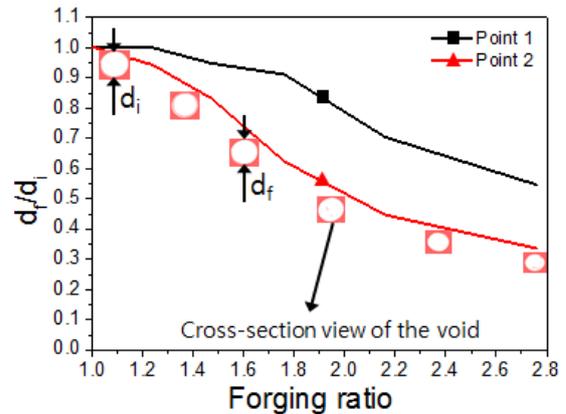


Fig. 3 Void size vs. forging ratio curves at points 1 and 2 during conventional cogging process

3. 신 공정 제안

Fig. 4는 1.5wt%C 초고탄소 워크롤을 제조하기 위한 새로운 방법의 단조 공정이다. 제안된 공정은 1차 점진 업세팅, 확산접합, 2차 점진업세팅, 코깅 공정으로 구성되었으며, 기존의 코깅 공정에서 충분히 큰 단조비에서도 기공을 압착할 수 없었던 문제점을 보완하기 위해 제시되었다. 보다 자세히 설명하면, 1차 점진 업세팅을 실시하여 내부 기공을 압착하고, 충분한 시간의 재가열 공정을 통해 압착된 기공계면에서 확산접합을 유도한다. 이후 2차 점진 업세팅을 통하여 사각 단면의 제품으로 성형한 후, 언고자 하는 형상의 최종 단조 제품을 얻기 위해 코깅 공정을 수행한다.

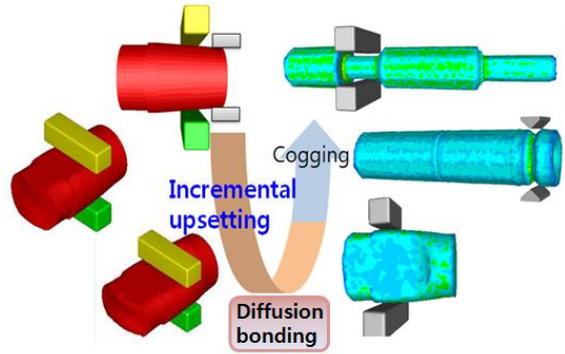


Fig. 4 Proposed forging process composed of the 1st incremental upsetting, the 2nd incremental upsetting, diffusion bonding and cogging

1차 점진 업세팅 공정 중 내부 기공의 거동을 확인 하기 위하여 Fig. 1과 동일한 모델을 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 이 때 잉고트를 축 방향으로 회전시키지 않고, 오로지 반경 방향의 한 방향으로만 반복적으로 단조를 수행한다. Fig. 5는 압하율에 따른 기공의 높이비(h_f/h_i)에 대한 그래프이다. 여기에서 h_i 및 h_f 는 그래프에 도시하였듯이 초기 및 변형 중의 기공의 높이를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 점진 업세팅 공정에서는 기공의 높이비가 빠르게 작아지며 잉고트 중심부의 point 2에서는 약 40%, 압탕부의 point 1에서는 약 45%의 압하율에서 기공이 압착된다. 또한 단면 형상은 압하율이 높아짐에 따라 점차 타원형태가 되고, 40~45%의 압하율에서 기공이 압착되는 것을 볼 수 있다. 즉, 잉고트를 회전하지 않고 반경 방향의 한 방향으로만 반복적으로 단조를 적용하기 때문에 내부의 기공은 빠르게 닫힌다.

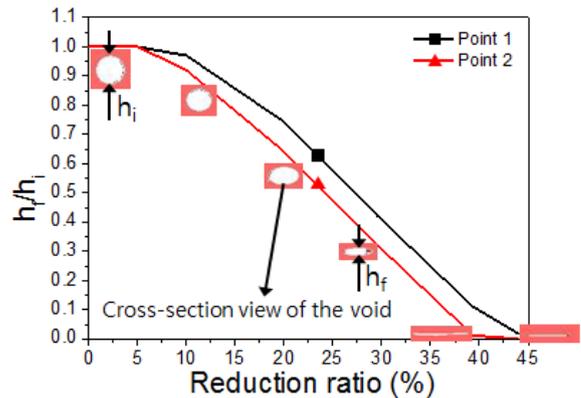


Fig. 5 Void size vs. reduction ratio curves at points 1 and 2 during incremental upsetting

4. 검증 실험

본 연구에서는 제안된 공정의 타당성을 검증하기 위해 축소모델을 적용하여 검증 실험을 수행하였다. 점진 업세팅 공정과 확산접합 후 인장시험을 수행하여 확산온도에 따른 접합 강도를 분석하였고, 또한 접합 유지 시간에 따른 접합강도도 분석하였다. 가시적으로 기공 압착 여부를 확인하기 위하여 확산접합 이후 기공이 압착된 위치에서 시편을 채취하여 조직관찰을 실시하였다.

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 직경과 길이가 각각



Fig. 6 Downsized specimen preparation for experiment

40mm인 원통형 시편의 중심부에 축 방향으로 시편의 길이의 약 50%만큼 직경 2mm의 기공을 만들고 기공의 바깥 끝부분에 파이프를 용접하였다. 이후 기공의 내벽에서 일어나는 산화를 최소화하기 위하여 기공 내부를 0.0005torr의 진공 상태를 부여하였고, 외부에서 공기가 유입되지 않도록 밀폐상태를 만들었다. 준비된 시편을 Fig. 7과 같이 1100°C에서 가열한 상태에서 점진 업세팅 공정을 수행하였으며, 공정 중 표면온도가 850°C가 되었을 때 시편을

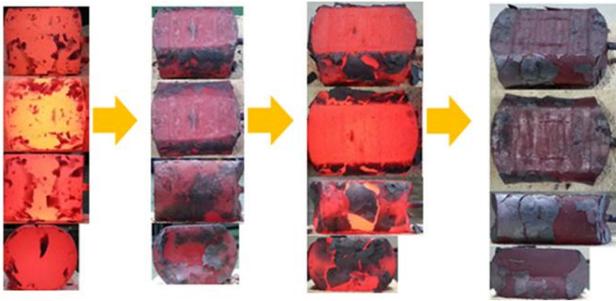


Fig. 7 Incremental upsetting experiments using downsized specimen with artificially-made cylindrical void with diameter of $\phi 2\text{mm}$

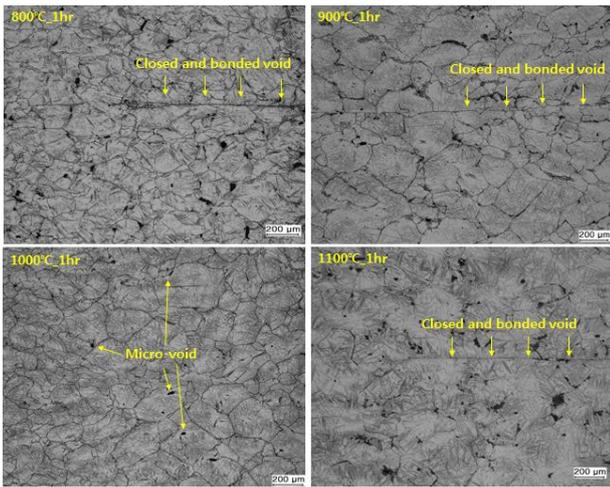


Fig. 8 Optical images after incremental upsetting at 1100°C and diffusion bonding at 800~1100°C for 1 hour

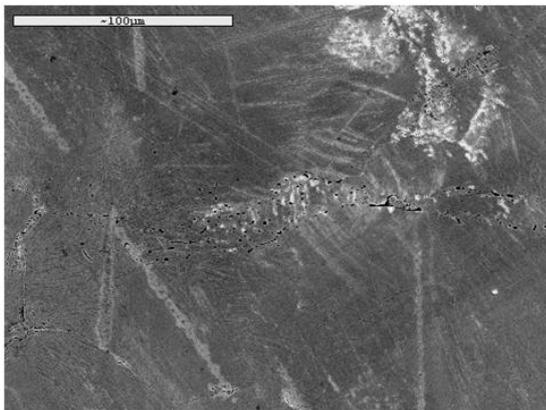


Fig. 9 SEM image after incremental upsetting at 1100°C and diffusion bonding at 1100°C for 1 hour

1100°C의 온도로 재가열하였다. 그리고 최종 압하율이 약 45%가 되었을 때 공정을 완료하였다. 점진

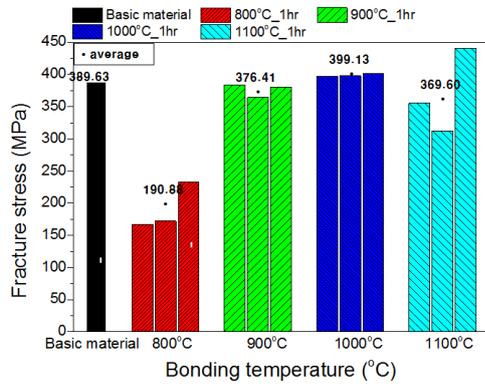
업세팅 공정이 완료된 후 가열로 안에서 일정시간 동안 재가열함으로써 기공 압착부에서 확산접합이 이루어지도록 하였다. 확산접합 시 접합온도와 접합시간의 영향을 살펴보기 위하여 800°C, 900°C, 1000°C, 1100°C에서 1시간, 그리고 1100°C에서는 10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 1시간 확산접합을 실시하였다. 1차 점진 업세팅과 확산접합을 실시하여 얻은 시편에서 기공이 포함되어 있는 부분과 포함되지 않은 부분에서 각각 인장시편과 조직관찰용 시편을 채취하여 기계적 접합강도와 미세조직을 분석하였다.

Fig. 8은 1차 점진 업세팅과 800°C~1100°C의 온도 조건에서 1시간 확산접합을 실시한 후 관찰한 조직 사진이다. 800°C~1100°C에서 확산접합을 적용했을 때 초기의 기공이 압착되어 계면으로 나타난다. 특히 1000°C에서는 압착계면을 볼 수가 없는데 이는 1차 점진 업세팅을 실시할 때 단조 온도, 앤빌의 피치 등 단조 조건이 적절하게 조절되었기 때문이다.

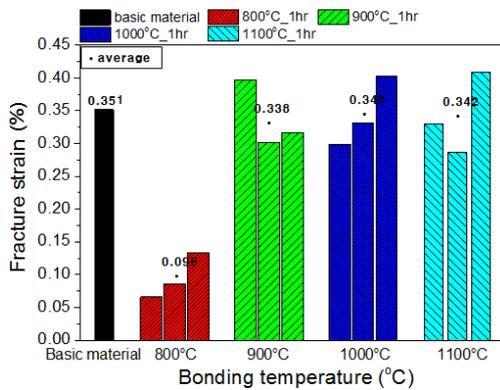
Fig. 9는 1100°C에서 1시간 확산접합을 실시한 시편의 SEM사진이다. Fig. 8에서 관찰한 압착계면이 많은 기공들로 구성되어 있었으며 그 크기가 1~3 μm 로 매우 작았다. 이러한 미세 기공은 잉고트의 주조 시 발생하는 기공의 크기와 비슷하며 대형 단조를 내부에 존재할 수 있다. 하지만 이러한 미세 기공은 단조를 통한 제품 양산 시 크게 영향을 주지 않는다. 따라서 조직관찰을 통하여 가시적으로 기공이 충분히 압착되었다고 판단되었다.

1차 점진 업세팅을 통해 압착된 기공이 확산접합을 통해 접합되었는지 판단하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 기공이 포함된 부분과 기공이 포함되어 있지 않은 부분에서의 파단 강도 및 파 단 변형률을 측정하였고, 이를 비교하여 기공의 접합여부를 판단하였다. Fig. 10은 접합온도에 따른 파단 응력 및 파단 변형률 그래프이다. 기공이 포함되지 않은 모재의 파단 응력과 파단 변형률은 약 390MPa과 0.35%이다. 800°C에서 확산접합을 실시한 시편에서의 파단 응력과 파단 변형률은 약 190MPa과 0.09%로 모재와 큰 차이가 있다. 하지만 900°C 이상에서 확산접합을 적용한 시편에서는 모재와 비슷한 크기의 파단 강도와 파단 변형률을 갖는다. 따라서 900°C 이상에서 확산접합을 실시해야 기공이 접합된다고 판단된다.

Fig. 11은 확산접합 유지시간에 따른 기공 압착부의

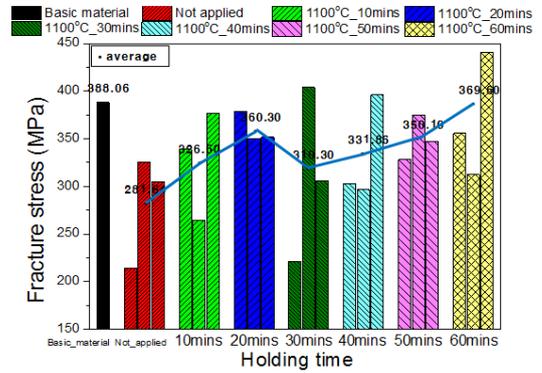


(a)

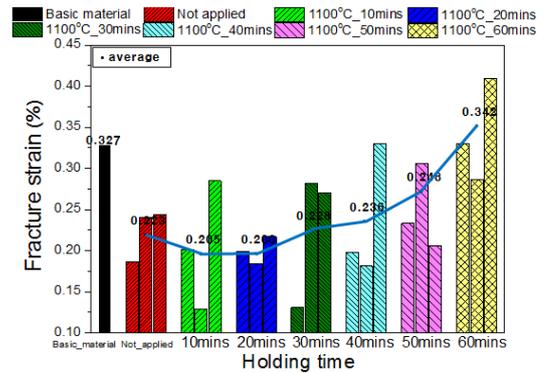


(b)

Fig.10 (a) Stress and (b) strain at fracture according to bonding temperature



(a)



(b)

Fig.12 (a) Stress and (b) strain at fracture according to holding time

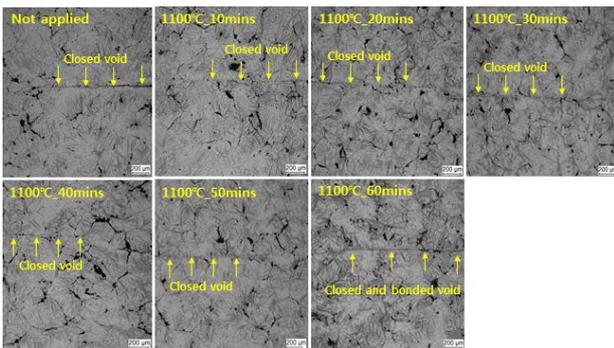


Fig.11 Optical images after incremental upsetting at 1100°C and diffusion bonding at 1100°C for 0~60mins

조직 관찰 사진이다. 확산접합을 적용하지 않은 사진을 비롯하여, 1100°C에서 10~60분동안 확산접합을 실시한 조직사진에서 압착 및 접합계면을 볼 수 있다. 이것의 기계적 특성을 분석하여 접합여부를 판단하기 위하여 인장시험을 실시하였다. Fig. 12는 인

장시험으로부터 얻은 접합 시간에 따른 파단 강도 및 파단 변형률 그래프이다. 기공이 포함되어 있지 않은 모재의 파단 강도는 약 388MPa이고 파단 변형률은 약 0.33%이다. 확산접합을 실시하지 않은 경우의 파단 강도 및 파단 변형률은 접합시간이 길어짐에 따라 점차 증가한다. 50분 이하의 접합시간을 부여했을 때에는 모재보다 낮은 파단 강도 및 파단 변형률을 갖는다. 60분동안 확산접합을 실시했을 때 파단 강도 약 370MPa, 파단 변형률 0.34%로 모재와 비슷하다. 따라서 1차 점진 업세팅을 통해서 압착된 기공은 확산접합 시간이 50분 이하에서는 접합되지 않고, 60분 이상 확산접합을 적용했을 때 접합된다고 판단된다.

본 연구에서 도출된 확산 접합 온도 및 시간은 압착된 기공 계면에서의 확산접합을 위한 조건으로, 실제 대형 잉고트의 재가열 공정에 요구되는 것과 다르다. 즉, 대형 잉고트를 적용하더라도 기공 압착 계면의 확산 접합을 위해서는 기공압착계면에서 최

소 900~1100°C의 온도에서 1hr의 시간을 유지해야 한다는 의미임을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 미세조직적으로 건전한 1.5wt%C 초고탄소 워크롤을 제조하기 위하여 기존의 단조 공정의 문제점을 파악하고 이를 해결하고자 새로운 단조 공정을 제시하였다. 또한 점진업세팅 및 확산접합 실험을 통하여 새로운 단조 공정의 유효성을 판단하였으며, 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 1차 점진 업세팅은 잉고트를 회전하지 않고 반경 방향의 한 방향으로만 반복적인 단조 공정이 이루어지는 공정이다. 때문에 1차 점진 업세팅을 적용하면 내부의 원통형 기공이 빠르게 압착되어 압하율 약 40~45%에서 압착된다.

(2) 800°C에서 확산 접합을 실시할 경우 압착된 기공이 접합되지 않지만, 900°C 이상에서 확산접합을 실시할 경우 기존의 기공이 없는 부분과 비슷한 파단 강도 및 파단 변형률을 나타내었다. 이를 통해 기공압착계면에서 확산접합이 이루어졌다고 판단된다.

(3) 확산접합 시간이 길어질수록 파단 시의 강도 및 변형률이 커진다. 하지만 확산접합 시간이 1100°C에서 50분 이하이면 압착된 계면이 강하게 접합되지 않고 60분 이상으로 적용했을 때 강하게 접합된다.

후 기

본 논문은 재료연구소 주요사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] C. Maidorn, D. Blind, 1985, Solidification and Segregation in Heavy Forging Ingots, Nucl. Eng. Des., Vol. 84, No. 2, pp. 285~296.
- [2] Y. D. Kim, J. R. Cho, W. B. Bae, 2010, Development of Forging Process Design to Close Internal Void, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, No. 3, pp. 415~422.
- [3] Steve P. Dudra, Y. T. Im, 1990, Analysis of Void Closure in Open-die Forging, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 30, No. 1, pp. 65~75.
- [4] Y. S. Lee, S. U. Lee, C. J. Van Tyne, B. D. Joo, Y. H. Moon, 2011, Internal Void Closure during the Forging of Large Cast Ingot using a Simulation Approach, J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 6, pp. 1136~1145.
- [5] C. Y. Park, D. Y. Yang, 1996, A Study of Void Crushing in Large Forgings I: Bonding Mechanism and Estimation Model for Bonding Efficiency, J. Mater. Process. Technol., Vol. 57, No. 1-2, pp. 129~140.
- [6] E. J. Kwak, G. P. Kang, K. Lee, 2012, A Study of Multiple Scale FEM Modeling for Prediction of Inner Void Closing Behavior in Open Die Forging Process, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 5, pp. 319~323.
- [7] I. J. Choi, H. J. Choi, D. J. Yoon, G. A. Lee, S. J. Lim, 2011, Evaluation methods for Void Closing Behavior in Large Ingot, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 5, pp. 339~343.
- [8] I. J. Choi, H. J. Choi, D. W. Kim, S. Choi, S. J. Lim, 2010, Void Closing Conditions of Large Ingot by Path Schedules, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 8, pp. 480~485.
- [9] M. C. Song, I. K. Kwon, Y. G. Park, 2007, A Study on the Parameters Determining the Void Crushing Ratio in the Cogging Process of Large Forged Products, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 7, pp. 502~508.
- [10] S. H. Kang, S. W. Kim, Y. S. Lee, 2010, Application of Modified Hydrostatic Stress Model to Internal Void Crushing in Forging of Large-scale Ingot, Steel Res. Int., Vol. 81, pp. 314~317.