

## 1.9wt%C 초고탄소 워크롤 단조 공정 : Part I – 기공생성 및 미세조직 분석

임형철<sup>1</sup> · 이호원<sup>1</sup> · 김병민<sup>2</sup> · 강성훈<sup>#</sup>

### Forging of 1.9wt%C Ultrahigh Carbon Workroll : Part I – Analysis on Void Formation and Microstructure

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

(Received July 30, 2013 / Revised October 31, 2013 / Accepted November 6, 2013)

#### Abstract

Compression tests were conducted at the various temperatures and strain rates to investigate void formation and microstructures behavior of a 1.9wt%C ultrahigh carbon steel used in forged workrolls. The microstructure, grain size and volume fraction of cementite were determined using specimens deformed in the temperature range from 800 to 1150°C and strain rates from 0.01 to 10/s. It was found from the microstructural analysis that the grain size is larger at higher temperatures and lower strain rate deformation conditions. In addition, a higher volume fraction of cementite was measured at lower temperatures. The brittle blocky cementite was fractured at 800°C and 900°C regardless of strain rate. As a result, numerous new micro voids were formed in the fragmented blocky cementite. It was also found that local melting can occur at temperatures of more than 1130°C. Therefore, the forging temperature should be controlled between 900°C and 1120°C. The temperature rise, which depends on the anvil stroke and velocity, was estimated through cogging simulation to find the appropriate forging temperature and to prevent local melting due to plastic work.

**Key Words** : Forged Workroll, Void Formation, Local Melting, 1.9wt%C Ultrahigh Carbon Steel, Compression Test, Microstructure, Forging Temperature

## 1. 서론

금속 압연용 워크롤과 같은 대형 제품은 대부분 업세팅과 코깅공정과 같은 자유단조를 통해 제조된다. 이때 사용되는 잉고트의 주조과정에서 기공과 같은 결함이 발생하고, 이러한 결함은 제품의 품질에 영향을 줄 가능성이 크다. 따라서 주조 잉고트 내부의 기공은 단조공정을 통해 제거하는 것이 바람직하다. 지금까지 많은 연구자들은 이러한 기공 결함을 제거하기 위하여 새로운 방법의 단조 공정

[1, 2]을 제시하였고, 기공압착을 위하여 많은 연구를 수행해왔다. 또한 효과적인 기공압착을 위해 기공의 압착 및 접합거동과 잉고트/앤빌의 형상/크기, 기공 크기, 정수압 응력, 유효 변형률 등과의 관계에 대해 연구해왔다[3~10]. 하지만 기존의 연구는 0.5wt%C 미만의 탄소강을 적용한 기공 압착 거동에 대한 연구가 대부분이다.

본 연구에서는 건전한 1.9wt%C 초고탄소 워크롤 제조를 위해서 압축시험과 미세조직 분석을 통하여 다양한 온도와 변형률 속도에서 1.9wt%C 초고탄소

1. 재료연구소 변형제어연구실

2. 부산대학교 기계공학부

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

강의 기공 생성 및 미세조직의 변화를 분석하였다. 또한 유한요소해석을 통해 코킹 공정 시 소재의 초기 온도, 단조 온도 범위, 앤빌의 속도 및 1회 압하량에 따라 워크롤 내부에 발생하는 온도상승에 대해 조사하였다. 이를 통하여 1.9wt%C 초고탄소 워크롤의 적정 단조 온도를 선정하고자 한다.

## 2. 기공 생성 거동 및 미세조직 분석

Fig. 1과 Table 1에서 나타낸 바와 같이 직경과 높이가 각각 10 및 12mm이고 노치가 있는 시편으로 고온 압축시험을 실시하였다. 노치의 깊이는 1mm이고 노치각은 45°이다. 압축 시험은 800~1,150°C에서 수행되었고, 0.01~10/s의 변형률 속도로 압축시험을 수행하였다. 또한 압하율은 최소 25%에서 최대 70%까지 부여하였다.

800°C~900°C에서는 압축시편의 노치부와 표면에서 인장 응력으로 인하여 Fig. 2와 같이 표면에 축방향 크랙이 발생했다. 반면 1,000~1,120°C의 압축 시험에서는 시편의 노치부와 표면에 크랙을 관찰할 수 없었다. 변형률 속도 10/s로 각각 800°C, 900°C, 1,000°C, 1,120°C에서 압하량 70%까지 압축 시험 이후의 미세조직을 Fig. 3에 나타내었다. 압축 시험 시 공통적으로 내부의 시멘타이트가 압축방향에 수직으로 배열되어 있다. 800°C와 900°C에서는 시멘타이트가 깨지면서 시멘타이트 내부에 새로운 미세기공이 형성된다. 반면, 1,000°C 및 1,120°C에서는 시멘타이트가 깨지지 않고 그대로 남아있어 새로운 미세기공이 형성되지 않았다. 따라서 결함이 없는 1.9wt%C 초고탄소 워크롤 단조품을 제조하기 위해서는 단조 공정 중 소재의 표면 온도가 900°C가 되기 전에 재가열해야 한다.

Fig. 4는 온도 800°C, 변형률 속도 10/s에서 압하율을 각각 25%, 50%, 70%로 하여 압축시험을 실시한 시편의 미세조직 사진이다. 800°C에서는 25%, 50% 및 70%의 압하량에서 모두 시멘타이트가 깨지면서 새로운 기공이 형성된다. 이것은 비교적 온도가 낮은 800°C에서는 작은 변형량에도 쉽게 시멘타이트가 깨짐으로써 새로운 미세기공이 발생함을 의미한다.

Table 2는 변형률 속도와 온도에 따른 결함의 발생 유무 및 형태를 나타낸다. 800°C에서는 변형률 속도에 상관없이 표면크랙 및 시멘타이트 내부에 기공이 생성되었다. 900°C에서는 비교적 빠른 변형률 속

도 1/s 및 10/s에서 표면에 크랙이 발생하고 시멘타이트가 깨지면서 내부에 기공이 생성된다. 반면 변형률 속도가 다소 낮은 0.01/s 및 0.1/s에서는 표면 크랙뿐만 아니라 내부에 기공도 발생하지 않았다. 이는 변형률 속도가 빠를수록 높은 응력이 작용하여 표면과 내부에 크랙 및 기공이 발생하는 것이다. 1,000°C와 1,120°C에서는 변형률 속도에 상관없이 크랙 및 기공이 형성되지 않았다.

1,150°C에서 변형된 시편 및 미세조직 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 변형률 속도는 10/s이고 70%까지

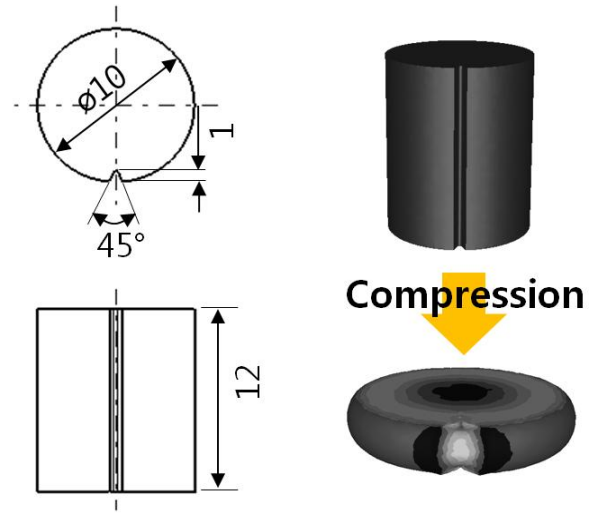
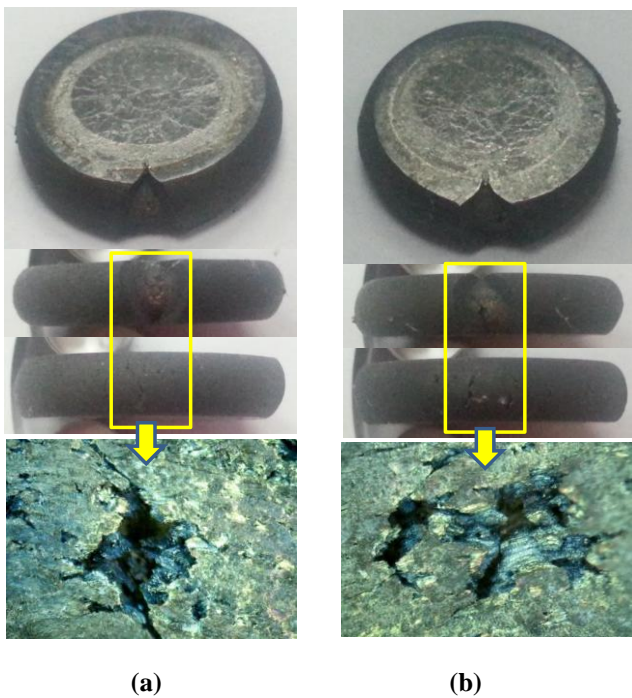


Fig. 1 Specimen with notch used for compression test

Table 1 Compression test conditions

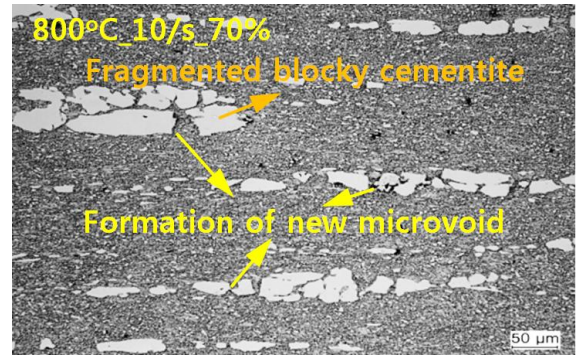
Temp. (°C)	Reduction ratio (%)	Strain rate (/s)
800	70	0.01, 0.1, 1, 10
	50	10
	25	10
900	70	0.01, 0.1, 1, 10
1,000	70	0.01, 0.1, 1, 10
1,100	70	0.01, 0.1, 1, 10
1,120	70	0.01, 0.1, 1, 10
1,130	70	10
1,140	70	10
	50	10
	30	10
1,150	50	10
	30	10



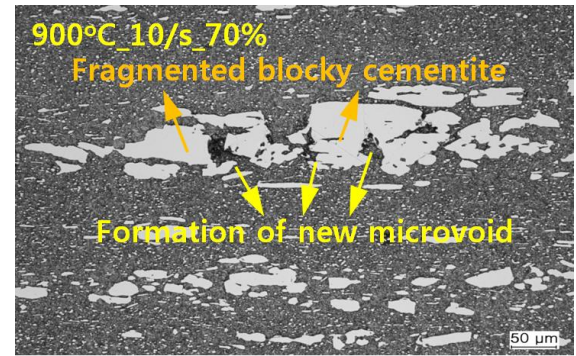
**Fig. 2** Generation of surface crack at notch and surface when compressed: (a) 800°C(0.01~10/s) and (b) 900°C(1~10/s)

압축을 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 시편의 중심부에서 국부적인 용융이 발생했다. 미세조직을 관찰한 결과, 중심부에는 전형적인 주조조직이 관찰되었다. 또한 1,130~1,150°C에서는 압하량에 상관없이 소재에 국부용융이 발생하였다. 따라서 소재의 온도가 1,130°C이상으로 상승할 경우 국부용융이 발생할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

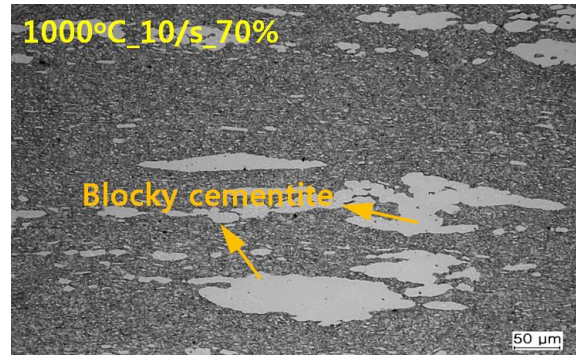
Fig. 6은 온도 및 변형률 속도에 따른 미세조직의 크기를 나타낸다. 미세조직의 크기는 온도의 영향을 많이 받는다. 온도가 낮은 경우에는 변형률 속도의 영향이 크지 않지만 온도가 높아지면 변형률 속도에 큰 영향을 받는다. 즉, 온도가 높을수록 변형률 속도가 낮을수록 결정립의 크기가 커진다. 온도와 변형률 속도에 따른 소재 내부의 시멘타이트의 분율을 Fig. 7에 비교하였다. 800°C에서 시멘타이트의 분율이 가장 높게 관찰되며, 그 다음으로 900°C에서 높게 관찰된다. 반면 1,000°C이상의 온도에서는 온도에 따른 내부 시멘타이트 분율 차이가 없는 것으로 판단된다. 또한 시멘타이트 분율은 변형률 속도와 관계가 없는 것으로 나타난다. 압축 시험에서 800~900°C에서 시멘타이트 내부에 미세 기공이



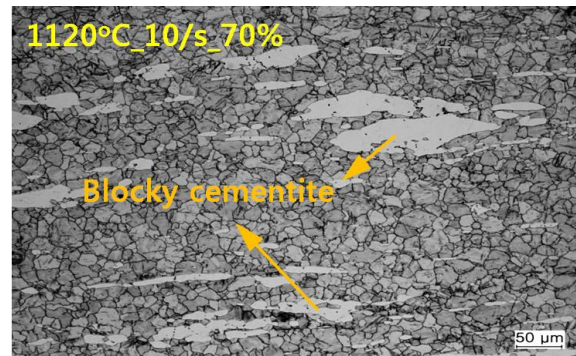
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fig. 3** Microstructures after compression test at (a) 800°C, (b) 900°C, (c) 1,000°C and (d) 1,120°C



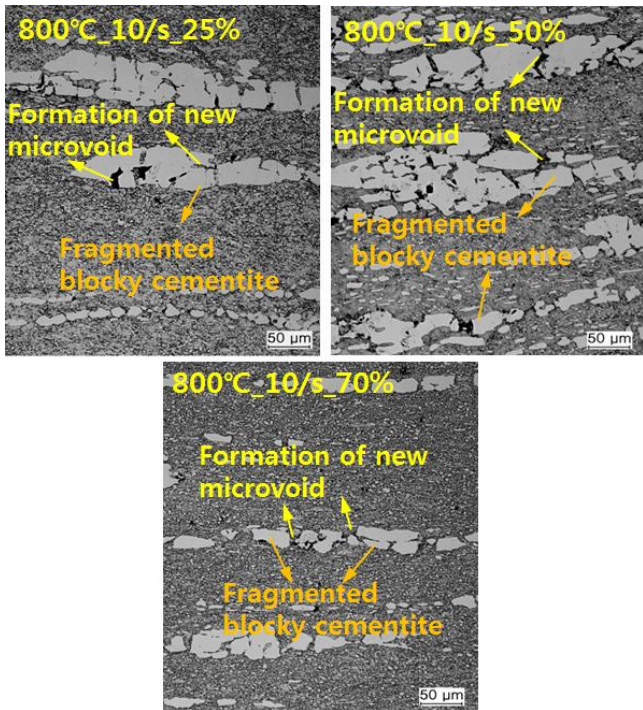


Fig. 4 Microstructures after compression test at reduction ratio of 25%, 50% and 70% (800°C)

Table 2 Defect generation according to various forming conditions (reduction ratio: 70%)

	0.01/s	0.1/s	1/s	10/s
800°C	O <sub>v</sub> O <sub>s</sub>	O <sub>v</sub> O <sub>s</sub>	O <sub>v</sub> O <sub>s</sub>	O <sub>v</sub> O <sub>s</sub>
900°C	-	-	O <sub>v</sub> O <sub>s</sub>	O <sub>v</sub> O <sub>s</sub>
1,000°C	-	-	-	-
1,120°C	-	-	-	-

O<sub>v</sub>: Microvoid, O<sub>s</sub>: Surface crack

많이 생성되는 원인이 이러한 시멘타이트 분율과 밀접한 관계가 있음을 보여준다.

### 3. 소성발열에 의한 온도 상승

일반적으로 단조 공정 시 발생하는 소성열의 대부분은 소재 내부의 온도 상승을 야기시킨다. 워크롤 제조를 위하여 고온으로 가열된 잉고트로 코킹 공정을 실시할 때, 잉고트 표면에서부터 온도가 점차 떨어지기 시작한다. 하지만 내부에서는 소성열로 인하여 표면에 비해 온도가 천천히 떨어지거나, 초기의 온도를 유지하거나, 심지어 온도가 상승하는

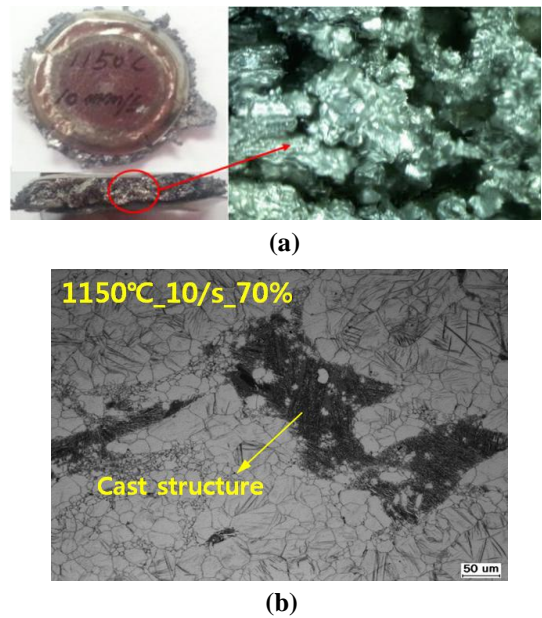


Fig. 5 Microstructural observation by compression tests at the 1,150°C

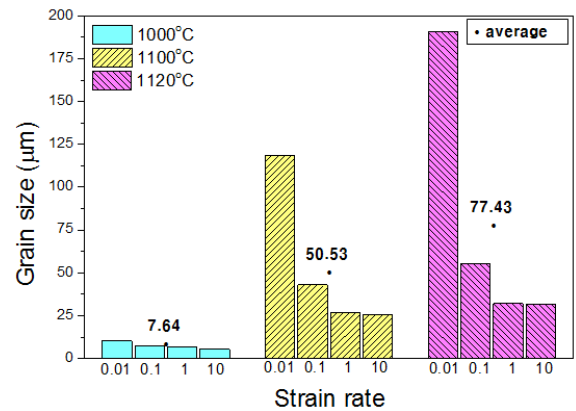


Fig. 6 Grain size according to temperature and strain rate

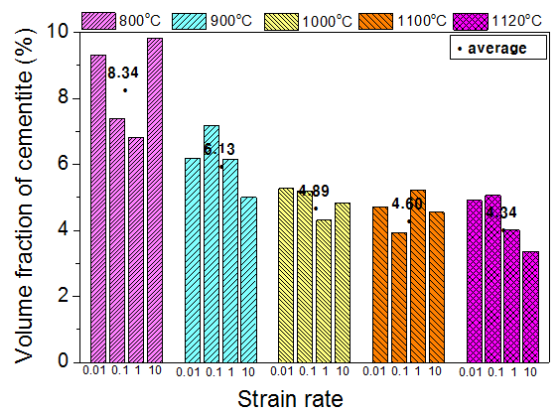


Fig. 7 Volume fraction of cementite according to temperature and strain rate

현상이 일어난다. 1.9wt%C 초고탄소의 코킹 공정 및 코킹 공정 중 발생 하는 온도 상승량을 분석하기 위해 상용 해석 프로그램인 FORGE를 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

Fig. 8에 제시된 유동응력을 사용하여 1.9wt%C 초고탄소 워크롤 제조를 위해 코킹 해석을 수행한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 해석에는 바디부의 최대 직경 1,410mm, 최소 직경 1,220mm, 압탕부를 포함한 잉고트 전체 길이 2,390mm이고, 고경비는 1.23인 잉고트 모델을 사용하였다. 단조 공정 시, 잉고트의 고경비가 낮기 때문에 업세팅을 하지 않고 코킹 공정만 실시하였다. 잉고트를 1,100°C로 가열하여 매니플레이터를 이용하여 반복적인 회전 및 이송을 하면서 반경방향으로 단조를 수행하였다. 몸체부 단조 후 넥부 단조를 실시하였고, 단조 해석을 통해 내부의 온도를 확인하였다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 넥부 단면의 표면-중심-표면으로 온도분포를 측정하였고, 측정된 온도분포 값을 Fig. 11과 같이 앤빌의 속도와 1회 압하량에 따라 나타내었다. 잉고트의 초기 온도는 1,100°C이고 코킹 공정을 통해 최대 1,145°C, 최소 1,120°C까지 내부 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 앤빌의 속도가 빠를수록, 1회 압하량이 클수록 내부의 온도가 더 많이 상승한다. 즉, 앤빌의 속도가 빠를수록 변형률 속도가 높아지고, 변형률 속도가 높아짐에 따라서 소성일이 커지기 때문에 내부의 온도 상승량이 커진다. 또한 앤빌의 속도가 동일할 때, 상대적으로 몸체부보다 직경이 작은 넥부에서 변형량이 많기 때문에 넥부에서의 내부 온도 상승량이 더 높다는 것을 판단할 수 있다.

따라서, 잉고트를 1,100°C까지 가열하여 단조 공정이 이루어질 경우 1.9wt%C 초고탄소강 잉고트 내부에 국부용융이 발생할 가능성이 높다. 또한 앤빌의 속도 및 1회 압하량이 클 때에도 국부용융이 발생할 가능성이 높기 때문에 잉고트의 초기 온도를 1,080°C, 앤빌의 속도를 10mm/s, 1회 압하량 50mm를 부여하여 코킹 해석을 수행하였다. Fig. 12에 코킹 공정 중 각 단계에서 잉고트 내부의 최고 온도를 나타내었다. 몸체부에 비해 비교적 직경이 작은 넥부에서 1,096°C로 가장 높이 온도가 상승하였다. 하지만 압축 시험의 결과에서 900~1,120°C에서는 시멘타이트 내부에 기공 생성 및 국부 용융에 의한 결함이 발생하지 않는 것으로 판단되었기 때문에,

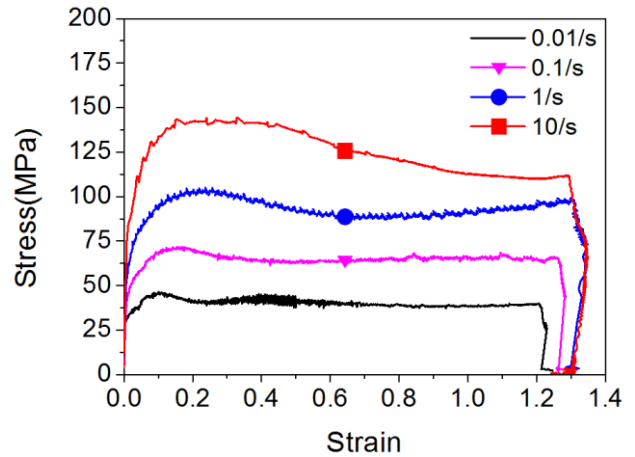


Fig. 8 Flow stress of 1.9wt%C ultrahigh carbon steel at 1,100°C

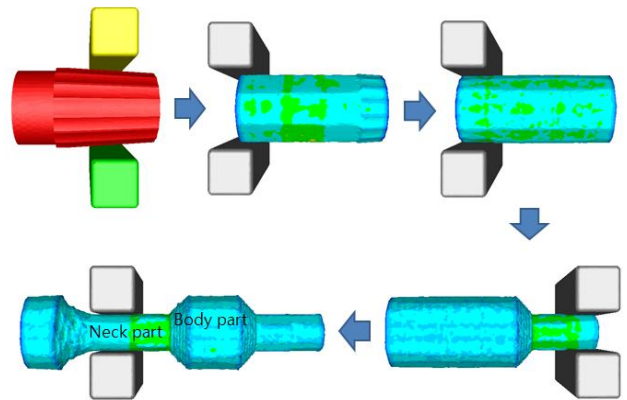


Fig. 9 Manufacturing process for 1.9wt%C ultra-high carbon workroll using cogging process

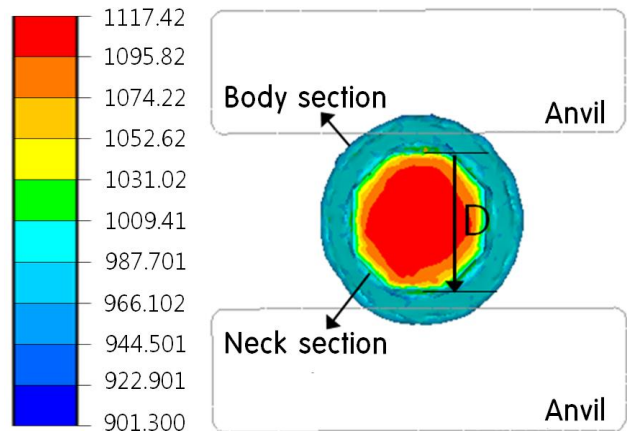


Fig.10 Temperature distribution in the cross-sections of body and neck

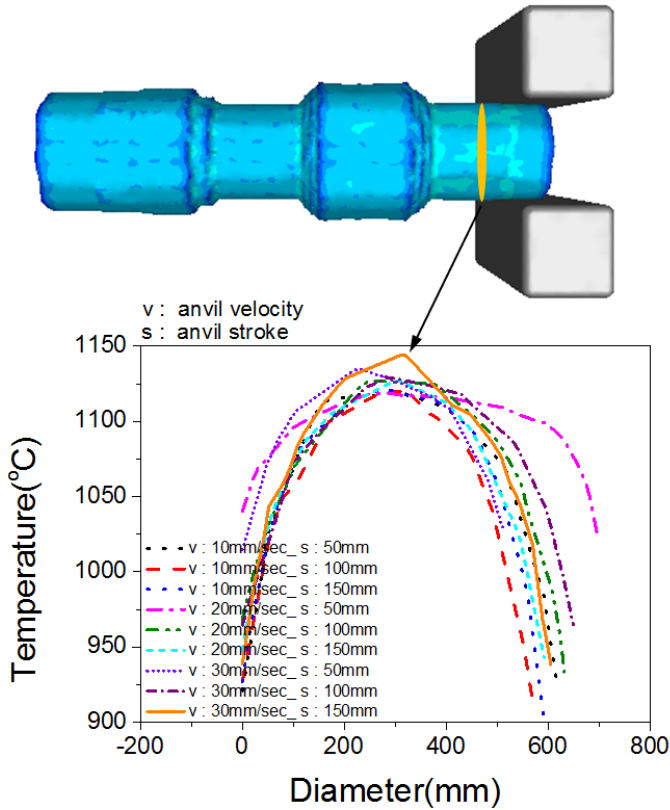


Fig.11 Temperature curves in the cross-section of neck according to anvil stroke and velocity

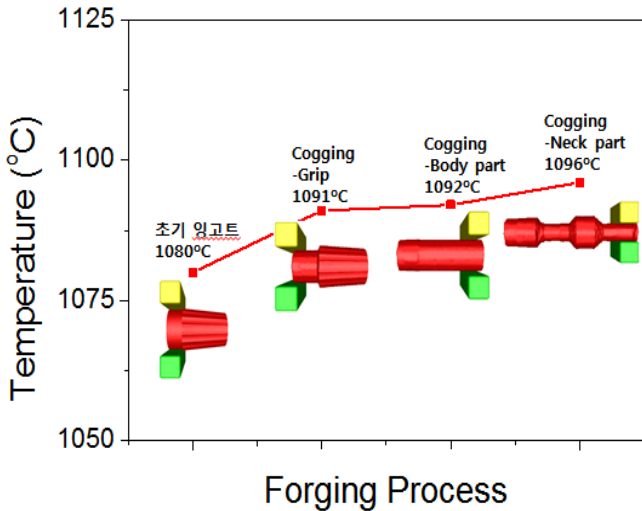


Fig.12 Predicted Maximum temperature during cogging process

잉고트의 초기 가열 온도는 1,080°C 이하가 바람직하며, 또한 미세조직적으로 건전한 워크롤 제조가 가능하다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 건전한 1.9wt%C 초고탄소 워크롤 제조를 위하여 압축 시험 및 유한요소해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 1.9wt%C 초고탄소강의 압축 시험 시 800°C에서는 변형률 속도에 상관없이 시멘타이트가 분쇄되면서 시멘타이트 내부에 미세기공이 형성된다. 900°C에서는 변형률 속도가 높을 때 시멘타이트가 분쇄되면서 미세기공이 형성되었다. 이는 변형률 속도가 빠를수록 상대적으로 취성인 시멘타이트 내에 큰 응력이 작용하기 때문에 시멘타이트가 분쇄되면서 기공이 형성되는 것으로 판단된다. 1,000~1,120°C에서는 각각 0.01~10/s의 변형률 속도로 70%의 압하율을 부여하여도 기공이 형성되지 않는다. 반면, 1,130°C의 온도 이상에서는 국부용융이 발생하였다. 따라서 단조 공정 중 잉고트의 온도는 최소 900°C 이상에서 최대 1,120°C이하가 되도록 제어하는 것이 바람직하다.

(2) 워크롤 제조 시 코깅 공정이 진행되는 동안 소성발열에 의하여 워크롤 내부의 온도가 상승하게 되는데, 1회 압하량이 클수록, 앤빌의 속도가 빠를수록 온도 상승량이 더 커진다. 잉고트의 초기 가열 온도가 1,100°C인 경우 앤빌 스트로크 및 가압속도에 따라 소성발열에 의한 온도 상승량이 최소 20°C에서 최대 45°C까지 예측되었다. 1,130°C 이상에서는 국부 용융이 발생할 가능성이 크기 때문에 잉고트의 초기 가열 온도 1,080°C 이하로 하되, 1회 압하량과 앤빌의 가압속도는 낮추는 것이 바람직하다.

#### 후 기

본 논문은 산업통상자원부 부품소재공동기술개발사업(과제명: 금속압연용 주조재 및 단조재 워크롤)의 일환으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

[1] S. H. Kang, H. C. Lim, H. Lee, Y. S. Lee, 2013, Efficient Process Design for Closure and Healing of Voids in Open Die Forging of Superhigh C-Steel Shaft, The 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming

- Processes/AIP Conf. Proc., Vol. 1532, pp. 733~740.
- [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.