



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2023년 2월  
석사학위 논문

# 열간압연용 아다마이트 워크롤의 고온 가공성 평가

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

고 준

# 열간압연용 아다마이트 워크롤의 고온 가공성 평가

**Evaluation of hot workability  
on adamite work roll for hot strip mill**

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

고 준

# 열간압연용 아다마이트 워크롤의 고온 가공성 평가

지도교수 이 종 국

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

고 준

## 고 준의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 신동찬 (인)

위원 조선대학교 교수 이종국 (인)

위원 한국생산기술연구원 박사 전재열 (인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

## 목 차

<b>List of Tables</b> .....	<b>IV</b>
<b>List of Figures</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XII</b>
<b>제 1 장. 서론</b> .....	<b>01</b>
<b>제 2 장. 이론적 배경</b> .....	<b>09</b>
<b>제 1 절. 아다마이트 워크롤</b> .....	<b>09</b>
1. 화학 성분 .....	<b>10</b>
2. 제조 공정 .....	<b>11</b>
3. 미세조직 .....	<b>12</b>
4. 기계적 특성 .....	<b>13</b>
<b>제 2 절. 동적재료모델</b> .....	<b>14</b>
<b>제 3 절. 공정지도</b> .....	<b>17</b>
<b>제 3 장. 1200℃ 가열온도에 의한 아다마이트</b>	
<b>주강의 고온변형거동</b> .....	<b>18</b>
<b>제 1 절. 서론</b> .....	<b>18</b>
<b>제 2 절. 실험재료 및 방법</b> .....	<b>18</b>
1. 아다마이트 주강 .....	<b>18</b>
2. 고온압축시험 .....	<b>22</b>

제 3 절. 결과 .....	25
1. 고온압축시험편 외부형상 .....	25
2. 고온 유동응력-변형을 선도 .....	27
3. Instability map .....	28
4. 미세조직 관찰 .....	33
5. Instability map과 미세조직의 상관관계 .....	46
제 4 절. 고찰 .....	48
제 5 절. 결론 .....	50

## 제 4 장. 1100℃ 가열온도에 의한 아다마이트

주강의 고온변형거동 .....	51
제 1 절. 서론 .....	51
제 2 절. 실험방법 .....	51
제 3 절. 결과 .....	53
1. 고온압축시험편 외부형상 .....	53
2. 고온 유동응력-변형을 선도 .....	54
3. Instability map .....	56
4. 미세조직 관찰 .....	61
5. Instability map과 미세조직의 상관관계 .....	74
제 4 절. 고찰 .....	76
제 5 절. 결론 .....	79

**제 5 장. 변형률에 따른 아다마이트 주강의  
고온변형거동 ..... 80**

제 1 절. 서론 ..... 80

제 2 절. 실험방법 ..... 80

제 3 절. 결과 ..... 82

    1. 고온압축시험편 외부형상 ..... 82

    2. 미세조직 관찰 ..... 84

제 4 절. 고찰 ..... 96

제 5 절. 결론 ..... 98

**제 6 장. 종합 결론 ..... 99**

**참고문헌 ..... 100**

## List of Tables

Table 1. Previous studies of adamite work roll for hot strip mill. ....	03
Table 2. Roll materials of the hot strip mill.[6] .....	09
Table 3. Chemical compositions of adamite work rolls.[7] .....	10
Table 4. Chemical compositions of high alloy adamite work roll.[29] .....	11
Table 5. Mechanical properties of adamite work roll.[31] .....	13
Table 6. Chemical compositions of adamite cast steel (wt%). .....	19
Table 7. Flow stress values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200°C. ....	28
Table 8. Strain rate sensitivity values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200°C. ....	29
Table 9. Ziegler parameter values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200°C. ....	31
Table 10. Flow stress values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100°C. ....	56
Table 11. Strain rate sensitivity values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100°C. ....	57
Table 12. Ziegler parameter values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100°C. ....	59

## List of Figures

Fig. 1. A flowchart of hot rolling production line.[2]	01
Fig. 2. Fatigue crack on the work roll surface.[13]	02
Fig. 3. Spalling on the work roll surface.[15]	02
Fig. 4. Dependence of carbide volume fraction on C and Cr contents.[16]	04
Fig. 5. Effect of hardness on wear resistance in wear testing.[16]	04
Fig. 6. The centrifugal casting method for manufacture of composite work roll.[18]	05
Fig. 7. Comparison of failure rate.[18]	06
Fig. 8. Optimal rolling parameters with respect to fatigue life.[19]	06
Fig. 9. Changes in demands of the work roll and corresponding progress made in roll materials.[20]	07
Fig. 10. The manufacturing process of adamite work roll.[7]	11
Fig. 11. Adamite work rolls.[7]	12
Fig. 12. Microstructure of adamite cast steel.[30]	12
Fig. 13. Hardness gradient in the working layer of adamite work roll.[7]	13
Fig. 14. Schematic diagrams of dynamic constitutive equation at constant temperature and strain; (a) A viscoplastic solid following power law behavior and (b) An ideal linear dissipator.	16
Fig. 15. A processing map of grade 250 maraging steel.[36]	17
Fig. 16. The as-received adamite cast steel.	19
Fig. 17. SEM images of adamite cast steel; (a) Low-magnification (x100) and (b) High-magnification (x3000).	19
Fig. 18. EDS results of (a) Spherical cementite and (b) Lamellar cementite.	21
Fig. 19. EDS results of intergranular carbide; (a) 1100°C, 0.001s <sup>-1</sup> and (b) 800°C, 0.001s <sup>-1</sup> .	21
Fig. 20. A phase map result of the hot compressed specimen at the test temperature of 1000°C with the strain rate of 0.001s <sup>-1</sup> .	22
Fig. 21. Gleeble 3800 system.	22
Fig. 22. Preparation of specimens for the hot compression test.	23
Fig. 23. A schematic diagram of the hot compression test by Gleeble 3800.	23

Fig. 24. A cutting method of the hot compressed specimen through the low speed cutting machine. .... 24

Fig. 25. Observed cross-sectional positions of the hot compressed specimen. .... 24

Fig. 26. Appearances of the hot compressed specimens with the heating temperature of 1200°C. .... 26

Fig. 27. Flow stress-strain curves obtained by the hot compression test with the heating temperature of 1200°C; The test temperature of (a) 1100°C, (b) 1000°C, (c) 900°C, and (d) 800°C. .... 27

Fig. 28.  $\ln(\sigma)$  vs.  $\ln(\dot{\epsilon})$  plots of the hot compressed adamite obtained at the strain of 50% with the heating temperature of 1200°C. .... 29

Fig. 29. An instability map obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200°C. .... 32

Fig. 30. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1200°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side. .... 34

Fig. 31. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1200°C; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ , (c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ . .... 35

Fig. 32. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1000°C with the heating temperature of 1200°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side. .... 37

Fig. 33. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1000°C with the heating temperature of 1200°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. ..... 38

Fig. 34. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 900°C with the heating temperature of 1200°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side. .... 40

Fig. 35. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 900°C with the heating temperature of 1200°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. ..... 41

Fig. 36. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 800°C with the heating temperature of 1200°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side. .... 43

Fig. 37. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 800°C with the heating temperature of 1200°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. ..... 45

Fig. 38. Reliability between microstructures and instability map obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200°C. .... 47

Fig. 39. A Phase diagram of adamite calculated using JMatPro. .... 48

Fig. 40. SEM images of adamite cast steel according to the temperatures; (a) 1200°C, (b) 1150°C, (c) 1130°C, (d) 1110°C, (e) 1103°C and (f) 1100°C. ... 49

Fig. 41. A schematic diagram of the hot compression test with the heating temperature of 1100°C. .... 52

Fig. 42. Appearances of the hot compressed specimens  
with the heating temperature of 1100°C. .... 54

Fig. 43. Flow stress-strain curves obtained by the hot compression test  
with the heating temperature of 1100°C; The test temperature of  
(a) 1100°C, (b) 1000°C, (c) 900°C, and (d) 800°C. .... 55

Fig. 44.  $\ln(\sigma)$  vs.  $\ln(\dot{\epsilon})$  plots of the hot compressed adamite obtained  
at the strain of 50% with the heating temperature of 1100°C. .... 57

Fig. 45. An instability map obtained at the strain of 50% for adamite  
with the heating temperature of 1200°C. .... 60

Fig. 46. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed  
specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature  
of 1100°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side,  
(b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  
 $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$   
: Around the bulged side. .... 62

Fig. 47. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed  
specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature  
of 1100°C; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ ,  
(c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ . .... 63

Fig. 48. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed  
specimens at the test temperature of 1000°C with the heating temperature  
of 1100°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side,  
(b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  
 $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$   
: Around the bulged side. .... 65

Fig. 49. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed  
specimens at the test temperature of 1000°C with the heating temperature  
of 1100°C; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ ,  
(c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ . .... 66

Fig. 50. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 900°C with the heating temperature of 1100°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side. .... 68

Fig. 51. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 900°C with the heating temperature of 1100°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. .... 69

Fig. 52. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 800°C with the heating temperature of 1100°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side. .... 71

Fig. 53. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 800°C with the heating temperature of 1100°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. .... 73

Fig. 54. Reliability between microstructures and instability map obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100°C. .... 75

Fig. 55. A schematic diagram of the heat treatment cycles according to the heating temperatures in Gleeble 3800. .... 76

Fig. 56. Appearances of the specimens at the test temperature of 1100°C according to the heating temperature of (a) 1200°C and (b) 1100°C. .... 77

Fig. 57. SEM images of the specimens at the test temperature of 1100°C according to the heating temperatures of (a) The heating temperature of 1200°C and (b) The heating temperature of 1100°C. .... 77

Fig. 58. SEM images of the specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1200°C; (a) Partial melting and (b) Mark of partial melting (High-magnification, x3000). ..... 78

Fig. 59. A schematic diagram of the hot compression test according to the heating temperatures with the strain of 30% and 20%. ..... 81

Fig. 60. Appearances of the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1200°C according to the strains. .... 82

Fig. 61. Appearances of the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1100°C according to the strains. .... 83

Fig. 62. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 30% and the heating temperature of 1200°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side ..... 85

Fig. 63. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 30% and the heating temperature of 1200°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. .... 86

Fig. 64. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 20% and the heating temperature of 1200°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side ..... 88

Fig. 65. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 20% and the heating temperature of 1200°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. .... 89

- Fig. 66. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 30% and the heating temperature of 1100°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side ..... 91
- Fig. 67. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 30% and the heating temperature of 1100°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. ..... 92
- Fig. 68. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 20% and the heating temperature of 1100°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side ..... 94
- Fig. 69. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 20% and the heating temperature of 1100°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>. ..... 95
- Fig. 70. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain rate of 1.0s<sup>-1</sup> according to the heating temperatures; The strain of (a-1), (b-1) 50%, (a-2), (b-2) 30%, and (a-3), (b-3) 20%. ..... 96

## ABSTRACT

### **Evaluation of hot workability on adamite work roll for hot strip mill**

Jun Ko

Advisor: Prof. Jong Kook Lee

Dept. of Advanced Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

Adamite cast steel with carbon contents ranging from 1.4% to 2.0% is used as work roll for the edger roll and the 4Hi work roll in the roughing mill, the front roll in the finishing mill, and the section rolling mill. Recent trends in development of rolling technology require the improvement of the properties of the work roll itself in direct contact with the rolled sheet as the rolling force and speed increase by lowering the temperature of the rolled sheet to increase the production of rolling and reduce energy consumption. Conventional adamite cast steel rolls when used for a long period have the negative effect on the production of rolling due to the generation of spalling on the surface and the disposal of service life because of reduced the strength and weakening high wear resistance. Hence, previous studies are being conducted to increase the service life of adamite cast steel rolls, one of the various methods is to improve properties through hot forging. The aim of this study is investigating the applicability of hot forging to improve properties and service life of adamite cast steel manufactured by the casting process. A gleeble thermal-mechanical test was performed to evaluate hot workability of adamite cast steel by applying hot forging. A gleeble test was performed under the two heating temperatures. In the first condition, adamite cast steel was heated to the temperature of 1200°C and then rapidly cooled to the test temperature of 1100°C, 1000°C, 900°C and 800°C, and the strain was compressed to 50% under all the test temperatures, and the strain rate of 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> and 0.001s<sup>-1</sup> was performed differently. In the second condition, adamite cast steel was heated to the temperature of

1100°C and then rapidly cooled to the test temperature of 1100°C, 1000°C, 900°C and 800°C, and the strain was compressed to 50% under all the test temperatures, and the strain rate of  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  and  $0.001s^{-1}$  was performed differently the same as the first condition. Instability maps were obtained using the flow stress-strain curves derived from a gleeble test, evaluation of hot workability and the stable forming conditions were derived through the microstructural analysis at the cross sections of the hot compressed specimens.

From the above experimental investigation, we could be obtained conclusions as follow;

In the heating temperature of 1200°C at the strain of 50%, the stable hot forming conditions are derived from the forming temperature range of 1020-880°C regardless of strain rates.

In the heating temperature of 1100°C at the strain of 50%, the stable hot forming conditions are derived from the forming temperature range of 1040-870°C regardless of strain rates.



최근 압연 강판의 기술개발 동향은 열연 강판이나 열연 후 냉연 강판 제작 시, 소재 자체의 강도에 따라 압연 하중이 다른데 고강도일수록 동일한 두께의 강판 제작을 위해서 강판과 직접 접촉하는 워크롤의 하중이 증가함에 따라 워크롤 자체의 고강도화를 위한 특성 향상이 요구된다.[10] 또한 압연 생산성 증대를 위해 워크롤의 속도를 높여 짧은 공정 시간 안에 많은 양의 강판 제작을 지향한다.[11] 이처럼 워크롤의 하중과 속도 증가로 인해 롤 표면에 발생하는 응력이 높아져 피로 균열 (Fatigue crack)을 유발하게 된다.[12,13] Fig. 2에서는 피로 응력에 의해 워크롤 표면에서 발생된 피로 균열을 보여준다. 피로 균열이 급격하게 진전하거나 워크롤을 장기간 사용하게 되면 피로누적과 열충격 균열에 의해 표면이 박리되는 스폐링 (Spalling) 위험 가능성이 커질 수명에 치명적이다.[14,15] Fig. 3에서는 워크롤 표면이 박리되어 일부분이 떨어져 나가 스폐링이 발생된 것을 보여준다. 이처럼 워크롤 표면에서의 피로 균열이나 스폐링 발생으로 인해 워크롤을 교체하게 되면 교체하는 동안 압연 공정이 멈추게 되고 생산성 (Productivity)이 저하됨과 동시에 교체 비용이 발생하기 때문에 열간압연용 워크롤의 수명 증대가 필요하다.

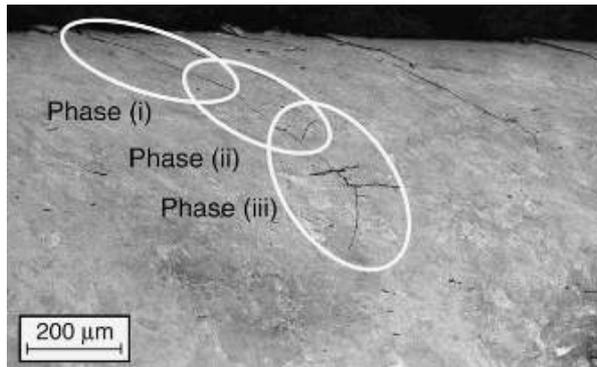


Fig. 2. Fatigue crack on the work roll surface.[13]

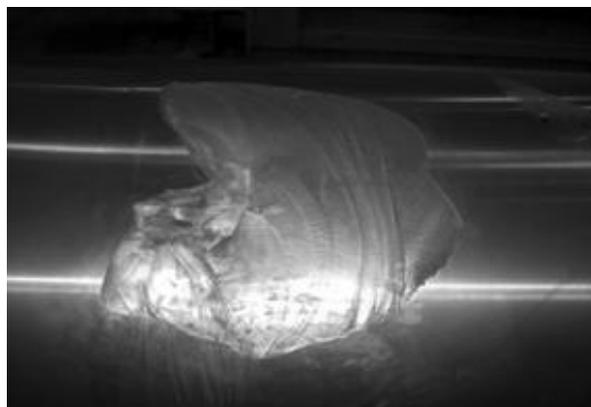


Fig. 3. Spalling on the work roll surface.[15]

Table 1. Previous studies of adamite work roll for hot strip mill.

Previous studies	
Alloy design	I. Kiss et al. “High hardness assurance”
	H. Noguchi et al. “Good wear resistance”
Temperature of roll surface	A. Ohnuki et al. “The temperature range of 500-650℃”
Development of manufacturing process	J. Honda et al. “Composite work roll”
Finite Element Method	Ž. Domazet et al. “Improving fatigue life”

열간압연용 아다마이트 워크롤의 기계적 특성 향상과 수명 증대에 관한 선행연구를 Table 1에 나타내었다.

첫 번째로 합금 설계 (Alloy design)를 통해 우수한 표면 경도를 가지는 아다마이트 워크롤의 화학 성분을 제시하였으며, 상세 내용으로는 다음과 같다. I. Kiss 등은 우수한 표면 경도를 가지는 아다마이트 워크롤의 화학 성분 중 탄소 함량은 1.70~1.80%, 규소는 0.58~0.64%, 크롬은 1.15~1.30%, 니켈은 1.30~1.50% 및 몰리브덴은 0.32~0.40%로 첨가됨을 보고하였다.[7] 특히, 화학 성분 중 탄소와 크롬 함량으로 인해 일반적인 아다마이트 워크롤의 브리넬 경도 (Brinell hardness) 값인 HB 270~381보다 HB 390~410으로 향상되었다.

이와 마찬가지로 합금 설계를 통해 아다마이트 워크롤 표면의 내마모성을 향상시키기 위한 화학 성분을 제시하였으며, 상세 내용으로는 다음과 같다. H. Noguchi 등은 아다마이트 워크롤 표면의 내마모성을 향상시키기 위해 탄소 함량은 2.00%로 제어함과 동시에 크롬 함량은 탄소 함량과 비례하게 첨가하는 것이 요구됨을 보고하였다.[16] 탄소와 크롬 함량에 기인하여 약 8%의 조대한 탄화물이 형성됨 (Fig. 4)에 따라 내마모성 향상과 더불어 기존 아다마이트 워크롤의 쇼어 경도 (Shore hardness) HS 40~60보다 HS 65~70으로 향상 (Fig. 5)되는데 이는, 열간압연기에서 요구되는 워크롤의 경도 범위에 충족한다.

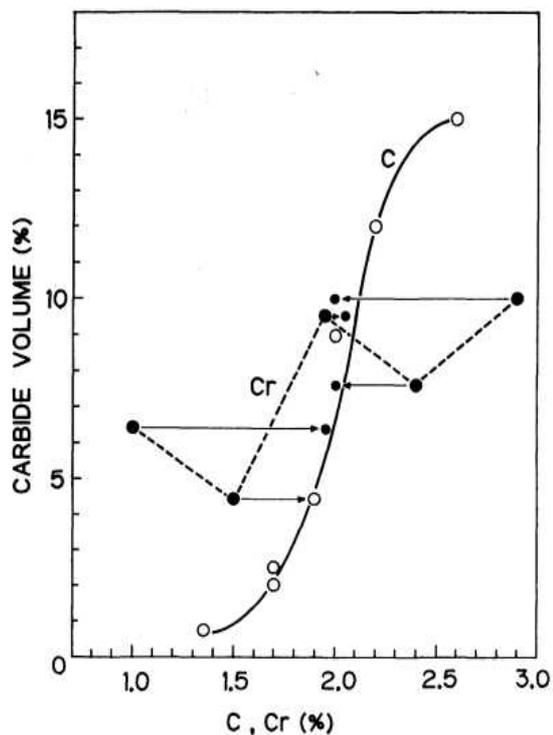


Fig. 4. Dependence of carbide volume fraction on C and Cr contents.[16]

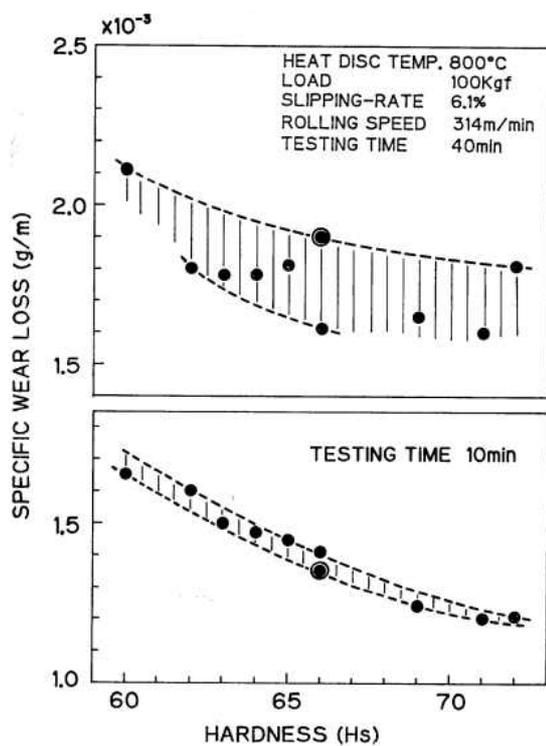


Fig. 5. Effect of hardness on wear resistance in wear testing.[16]

두 번째로 압연 공정 중 아다마이트 워크롤의 표면 온도 제어를 통해 롤의 수명을 증대시키기 위한 적정 온도 범위를 제시하였으며, 상세 내용으로는 다음과 같다. A. Ohnuki 등은 아다마이트 워크롤의 수명 증대를 위해 열간압연 공정 중 롤 표면의 적정 온도는 500~650℃ 범위로 보고하였다.[17] 열간압연 공정 중 아다마이트 워크롤의 표면 온도는 슬래브와 접촉하는 동안 초기에 약 650℃로 가열된 이후, 정해진 사이클동안 약 50℃까지 물로 냉각된다. 롤의 표면 온도가 650℃ 이상에서는 표면층의 기지가 연화됨에 따라 소성 변형되며, 400~500℃ 사이에서는 마그네타이트 (Magnetite) 피막이 표면층에 생성되어 마모를 급격히 감소시킨다.

이와 더불어 기존에 정적 주조법을 통해 제조되는 아다마이트 워크롤의 자체 고강도화를 위해 기존 제조 공정이 아닌 원심 주조법을 통해 고강도 복합 워크롤을 제조하였으며, 상세 내용으로는 다음과 같다. J. Honda는 기존 아다마이트 워크롤의 자체 고강도화를 위해 원심 주조법 (Fig. 6)을 적용하여 워크롤의 외층재는 아다마이트, 내층재는 고강도 주철로 구성된 고강도 복합 워크롤을 제조하였다.[18] 고강도 복합 워크롤은 기존 아다마이트 워크롤의 파손 비율인 11.5% 대비 2.5%로 감소되었으며 Fig. 7에 나타내었다.

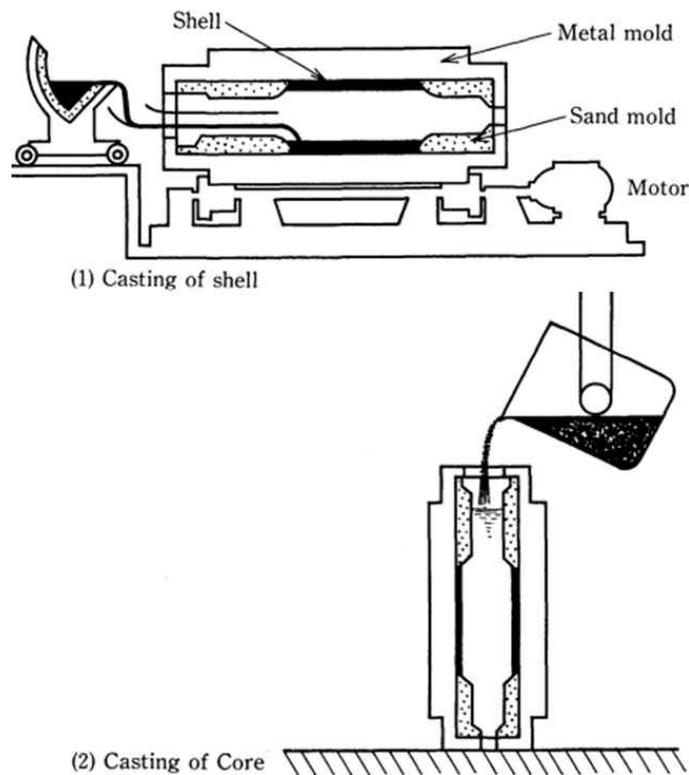


Fig. 6. The centrifugal casting method for manufacture of composite work roll.[18]

Casting method	Periods	Failures					Failure rate (%)	
		No. of rolls examined	Spalling of chill	Severe cracking	Breakage	Cavity		Segregation
Double-pour method	1966 ~ 1968	147	8	3	3	3	0	11.5
Centrifugal casting method	Period I*	325	2	0	0	0	6	2.5
	Period II**	321	0	0	0	0	0	0

Fig. 7. Comparison of failure rate.[18]

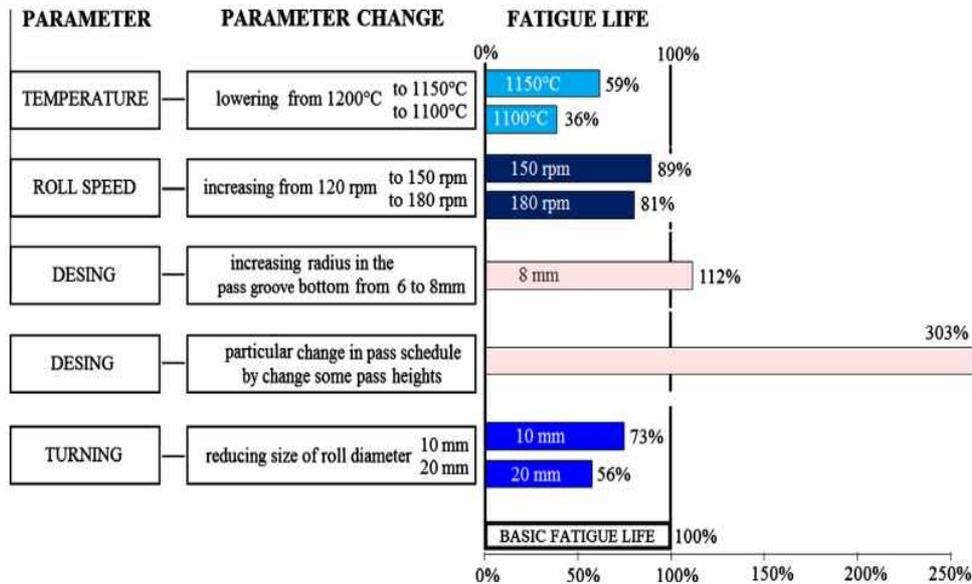


Fig. 8. Optimal rolling parameters with respect to fatigue life.[19]

다음으로 유한요소법 (Finite Element Method)을 통해 아다마이트 워크롤을 포함한 열간압연용 롤의 최대 피로 수명 증대와 생산성 향상을 위한 가열온도, 롤의 속도 및 설계 등 매개변수의 영향을 제시하였으며, 상세 내용으로는 다음과 같다.

Ž. Domazet 등은 열간압연 공정에서 워크롤의 피로 수명에 영향을 미치는 주요 요인 (Fig. 8) 중 가열온도는 1100°C, 1150°C 및 1200°C로 변경할 경우, 압연 하중이 감소함에 따라 롤의 피로 수명이 36%, 59% 및 100%로 향상되고 워크롤의 속도를 180rpm, 150rpm 및 120rpm으로 변경할 경우, 롤에 가해지는 접촉응력이 감소함에 따라 피로 수명은 81%, 89% 및 100%로 향상됨을 보고하였다.[19]

이와 같이 상기 연구자들은 열간압연용 워크롤의 기계적 특성 향상과 수명 증대 관한 다양한 연구를 수행해왔다. 최근, 일본에서는 기존에 주조 공정으로 제조되는 열간압연용 아다마이트 워크롤의 특성 향상과 수명 증대를 위한 다양한 방안 중, 열간단조를 적용한 사례가 있다.[20] Fig. 9에서는 워크롤의 수요 변화에 따른 롤 재료와 제조 공정의 변화를 보여준다. 열간압연 공정 중 워크롤의 표면이 거칠어지거나 롤 소모 감소와 에너지 절약을 위해 기존 롤 재료를 대체하거나 제조 공정의 변화가 주를 이루고 있다. 하지만, 아다마이트 워크롤에 소성 변형을 통해 롤의 미세조직을 치밀하게 만들어주는 연구는 제한적이다.

열간단조 공정은 소재를 재결정온도 이상으로 가열하여 변형저항이 낮아 성형이 잘되고 미세조직은 균질성 증가와 더불어 치밀해지기 때문에 기존 열간압연용 주강롤에 단조 공정을 적용한다면 주조 시 생성되는 결함이 개선될 것으로 기대된다.[21,22]

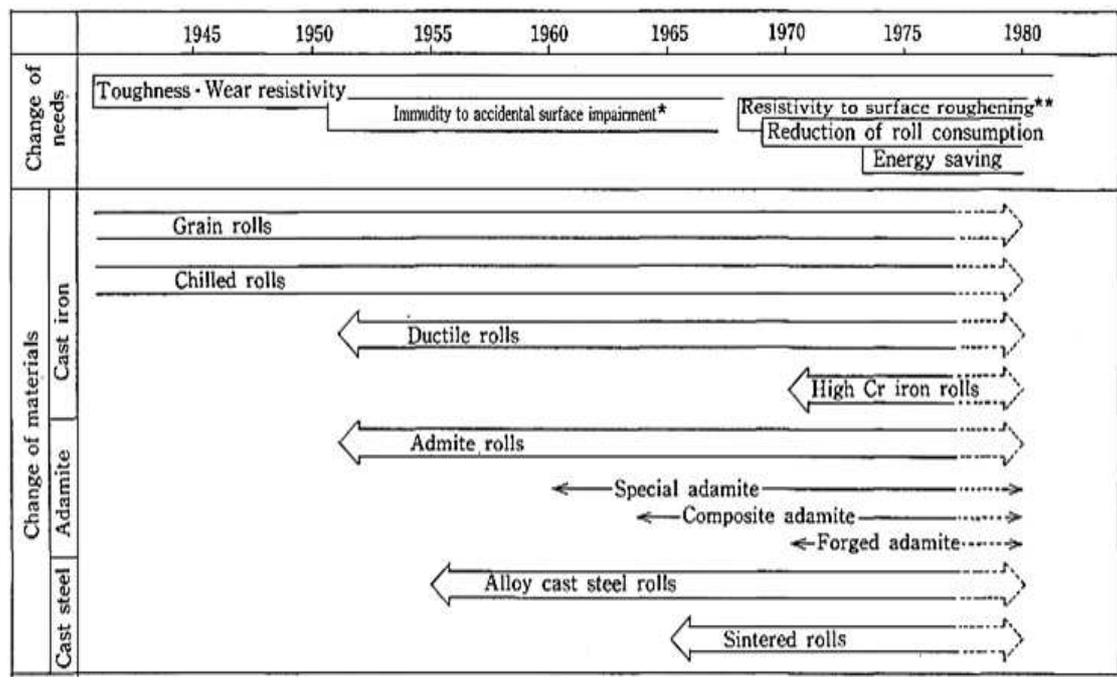


Fig. 9. Changes in demands of the work roll and corresponding progress made in roll materials.[20]

본 연구자는 기존에 주조 공정으로 제조되는 열간압연용 아다마이트 워크롤에 열간단조를 적용하기에 앞서 기존의 주강롤보다 결함이 적고 건전한 워크롤 제조 가능성을 검토하고자 고온압축시험을 통해 고온 가공성 평가를 진행하였다. 고온압축시험 시, 가열온도는 1200℃와 1100℃로 두 가지 조건으로 실시하였으며 변형률은 50%로 동일하게 압축하였다. 아다마이트 주강의 고온 가공성 평가와 안정한 열간 성형 조건을 도출하기 위해 다양한 압축시험온도와 변형률 속도에 따른 고온 유동응력-변형률 선도를 통해 Instability map을 작성하였다. Instability map의 Ziegler parameter ( $\xi$ )를 기준으로 고온 가공성을 평가하였으며 고온압축시험편 단면의 미세조직과 비교 분석을 통해 신뢰성을 확인하였다.

## 제 2 장. 이론적 배경

### 제 1 절. 아다마이트 워크롤

Table 2. Roll materials of the hot strip mill.[6]

Stand		Roll materials	
		Conventional materials (Hs)	Current materials (Hs)
Roughing mill	Scale Breaker	Ductile cast iron (50~60) Cr-Mn cast steel (30~40)	Ductile cast iron (50~60) Hardfacing roll (60~70)
	Edger Roll	Ductile cast iron (50~60) Cr-Mn cast steel (30~40)	Ductile cast steel (50~60) Cr-Mn cast steel (30~40) Hardfacing roll (60~65) Adamite (40~50)
	2Hi work roll	Ductile cast iron (55~65) Cr-Mo cast steel (35~40) Graphite cast steel (35~40) Composite cast steel (50~65)	Composite cast steel (50~60) Ni-Cr-Mo cast steel (50~55) Cr-Mo cast steel (35~45) Hi-Cr cast steel (70~75)
	4Hi work roll	Adamite (40~50) Graphite cast steel (40~45) Cr-Mo cast steel (40~50)	Adamite (45~55) Hi-Cr cast steel (70~75)
	Front roll	Adamite (48~54)	Adamite (50~55) High hardness Adamite (60~) Hi-Cr cast steel (70~75) HSS (80~85)
Finishing mill	End roll	High alloy Grain (79~83)	High alloy Grain (79~83) HSS (80~85)

Table 2에서는 열간압연기에서 상용되는 워크롤 재질을 보여준다.[6] 1980년대를 기준으로 워크롤 재질 자체보다는 기존 워크롤 재질 대비 표면 쇼어 경도 값이 높은 질적 변화가 주를 이루고 있다. 이는 압연 생산량 증대를 위해 워크롤의 압하량이 기존 대비 갈수록 증가됨에 따라 압연재와 직접 접촉하는 워크롤이 받게되는 접촉응력이 증가하기 때문에 워크롤의 표면 경도 개선이 요구되고 있음을 알 수 있다, 열간압연용 아다마이트 워크롤은 조압연 공정에서 폭압연기와 4단 압연기, 사상압연 공정에서 전단 스탠드 워크롤로 사용된다.

## 1. 화학 성분

Table 3. Chemical compositions of adamite work rolls.[7]

Adamite work rolls	Class 1	Class 2	Class 3
Composition (%)			
Carbon [C]	1.40-1.60	1.50-1.80	1.60-2.00
Silicon [Si]	0.40-0.70	0.30-0.70	0.30-0.70
Manganese [Mn]	0.50-0.80	0.50-1.00	0.50-1.00
Nickel [Ni]	0.40-1.00	0.70-1.10	max 1.50
Chromium [Cr]	0.80-1.20	1.00-1.40	1.10-1.60
Molybdenum [Mo]	0.20-0.40	0.20-0.40	0.25-0.50

Table 3에서는 아다마이트 워크롤의 일반적인 화학 성분을 보여준다.[7] 탄소 함량은 1.40~2.00% 사이의 고탄소강으로 기타 합금 원소인 규소는 0.30~0.70%, 망간은 0.50~1.00%, 니켈은 0.40~1.50%, 크롬은 0.80~1.60% 및 몰리브덴은 0.20~0.50% 첨가된다.

탄소는 필요한 경도 확보를 위해 첨가되며, 오스테나이트 기지상을 안정화시킴과 동시에 첨가원소인 크롬, 몰리브덴 등과 결합하여 고경질의 탄화물을 형성한다. 하지만 탄소 함량이 지나치게 많을 경우에는 탄화물이 많이 생성되어 소성가공성이 저하되는 문제가 있다.[23]

규소는 함량에 따라 기지에 고용되어 경도, 인장을 향상시키는 고용강화 (Solid solution strengthening) 효과를 일으키며, 열처리 후에는 탄화물의 구상화 (Spheroidization) 로 인해 기계적 성질이 향상되지만 다량 첨가할 경우 침상 조직을 발달시켜 오히려 인성이 저하된다.[24]

망간은 강도 향상을 통해 경도의 균일성을 높일 수 있으며 규소와 첨가량의 비율에 따라 공정 반응에 큰 영향을 미친다. 적은 비용으로도 강도를 증가시키는 효과가 있지만 다량 첨가 시, 소재의 점도 (Viscosity)가 높아져 피삭성 (Machinability)을 저하시킬 수 있다.[25,26]

니켈, 크롬 및 몰리브덴과 같은 합금 원소의 조합은 일반적으로 요구하거나 원하는 물리적 및 기계적 특성을 달성하는데 사용된다. 예를 들면, 아다마이트 워크롤의 미세 조직에서 시멘타이트와 페라이트를 포함한 조대한 펄라이트 조직이 얻어지는 경우에는 롤을 그대로 사용할 수 없기 때문에 미리 설계된 열처리 사이클을 거쳐 합금 원소를 균일하게 분포시키고 미세한 기지 조직을 바탕으로 최적의 미세조직을 얻는다.[27,28]

Table 4. Chemical compositions of high alloy adamite work roll.[29]

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
1.10~2.40	0.30~1.00	0.60~1.20	0.80~1.70	0.80~1.20	0.20~0.50	≤0.035	≤0.030

Table 4에서는 현재 국내에서 제조되는 현대제철의 고합금 아다마이트 워크롤의 화학 성분을 보여준다.[29] 기존 아다마이트 워크롤과 동일한 합금 원소가 첨가되지만, 롤의 특성 향상을 위해 탄소와 규소 등의 합금 첨가량은 더 증가된 것이다. 화학 성분의 범위는 탄소 함량의 경우 1.10~2.40%, 규소는 0.30~1.00%, 망간은 0.60~1.20%, 니켈은 0.80~1.70%, 크롬은 0.80~1.20% 및 몰리브덴은 0.20~0.50%이다.

## 2. 제조 공정

Fig. 10에서는 아다마이트 워크롤의 제조 공정을 보여준다.[7] 아다마이트 워크롤은 정적주조법을 통해 제조되는 주강롤이며, 아다마이트 워크롤 외에도 정적주조법은 다른 조압연기와 형강압연기용 워크롤을 제조하는데 널리 상용되는 방법 중 하나이다. 정적주조법은 용융 금속을 몰드에 주입한 후 응고가 완료되면 주조재가 제조되는데 액체에서 고체로 응고하는 과정에서 발생하는 수축공을 방지하기 위해 주조 설계를 통한 후공정이 포함되는 경우가 있다. Fig. 11에서는 정적주조법을 통해 제조된 실제 아다마이트 워크롤 사진을 보여준다.[7]

정적주조법 외에도 원심주조법을 통해 제조되는 열간압연용 워크롤이 있으며 원심주조와 정적주조의 가장 큰 차이점은 원심주조는 응고하는 동안 회전하면서 원심력에 의해 형성된 압력으로 주물을 얻는다.

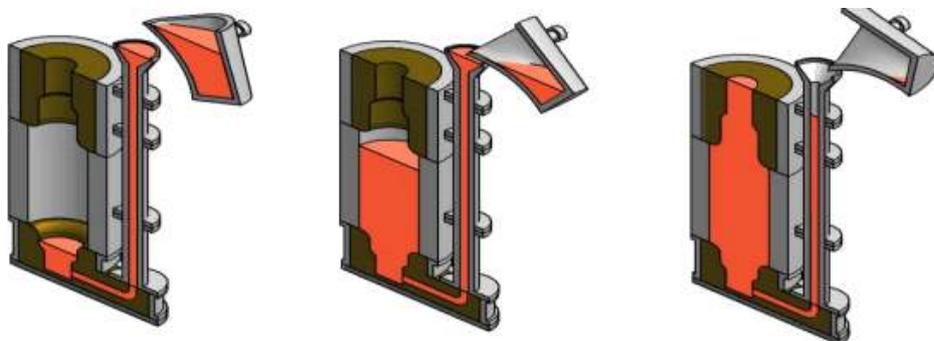


Fig. 10. The manufacturing process of adamite work roll.[7]



Fig. 11. Adamite work rolls.[7]

### 3. 미세조직

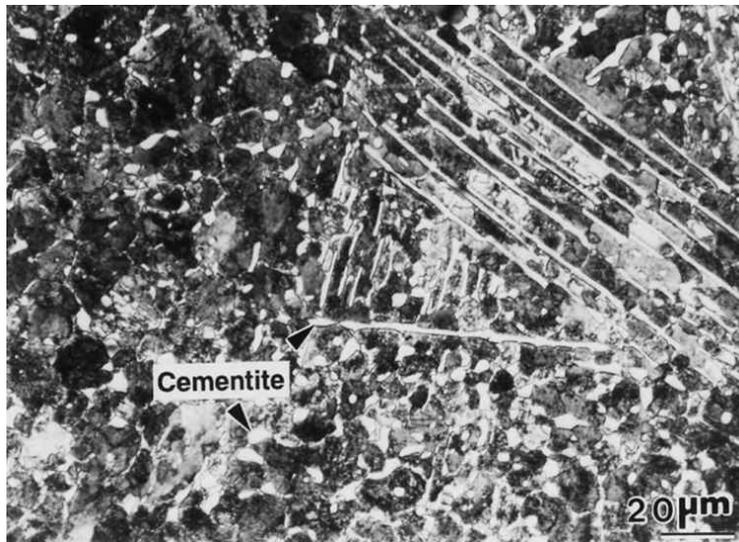


Fig. 12. Microstructure of adamite cast steel.[30]

Fig. 12에서는 아다마이트 주강의 미세조직을 보여준다.[30] 아다마이트 주강의 미세조직은 펄라이트 기지와 구형 및 층상 형태의 시멘타이트 ( $Fe_3C$ )로 구성된다. 펄라이트는 면심 입방 격자 (Face Centered Cubic lattice)의  $\gamma$  고용체에서  $\alpha$  고용체와 시멘타이트가 공석 반응을 통해 동시에 석출하는 층상 조직으로 경도와 내마모성 사이에서 좋은 균형을 이룬다.

시멘타이트는 0.8%~6.67% 탄소 함량의 고탄소강부터 주철에 이르기까지 철강 재료의 주된 성분으로 철과 탄소의 화합물로 이루어진 준안정 상태의 탄화물이다. 경도와 취성 (brittleness)이 매우 커 충격에 약하다.

#### 4. 기계적 특성

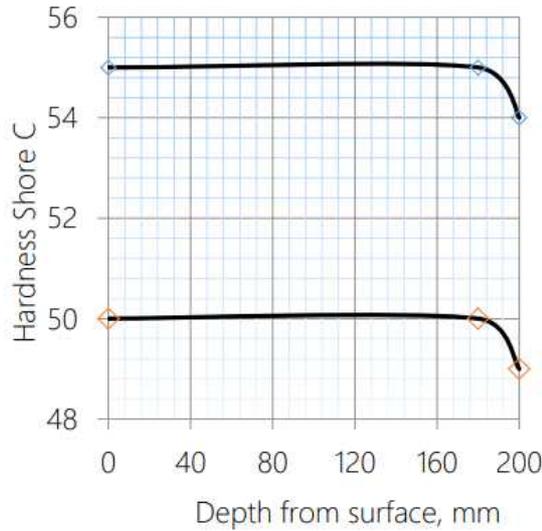


Fig. 13. Hardness gradient in the working layer of adamite work roll.[7]

Table 5. Mechanical properties of adamite work roll.[31]

Vickers hardness test results	
Pearlite matrix (Hv)	307
Cementite (Hv)	576
Overall Hardness (Hv)	335
Tensile test results	
Tensile Strength (Mpa)	400~700
Fracture Strength (Mpa)	950
Toughness (Mpa)	15~21

Fig. 13에서는 아다마이트 워크롤의 표면부 경도 구배를 보여준다.[7] 기계적 특성 중 경도의 경우, 롤의 표면으로부터 깊이 약 180mm까지는 경도 저하가 없다.

Table 5에서는 아다마이트 워크롤의 기계적 특성을 보여준다.[31] 아다마이트 워크롤은 펄라이트 기지와 시멘타이트로 구성되는데 펄라이트 기지의 경도는 Hv 307, 시멘타이트의 경도는 Hv 576으로 전체 주강의 경도는 Hv 335 (Hs 47) 값을 가진다. 인장강도는 탄소 함량 (1.4~2.0%C)에 따라 최소 400 ~ 최대 700Mpa, 파괴강도는 950Mpa 및 인성은 15~21Mpa 수준의 값을 가진다.

## 제 2 절. 동적재료모델

동적재료모델 (Dynamic Material Model, DMM)은 재료의 가공성과 미세조직 변화 사이의 관계를 나타낸 것으로, Prasad 등에 의해 제안되었다. 소성가공 시 고온변형 거동에 대한 특성을 평가 할 수 있으며 다양한 열간 성형 조건에서 소성 안정 영역과 불안정 영역을 구분하여 최적의 공정 조건을 도출할 수 있다.

Prasad 등은 고온 및 변형률 속도 조건에서 재료가 받는 총 에너지는 두 가지의 에너지로 구분되는데 소성 변형에 의해 소모되는 에너지와 동적 회복 (Dynamic recovery, DRV), 동적 재결정 (Dynamic recrystallization, DRX) 등과 같은 미세조직 변화의 내부 에너지로 에너지 분산 특성을 나타냄을 제시하였다.[32] 일정한 변형률에서 재료에 대한 고온 유동응력은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

K는 온도, 변형률 등에 의존하는 강도상수이며, m은 안정한 재료 유동에 대한 기준으로 변형률 속도 민감도 (strain rate sensitivity)를 나타낸다. 식 (1)을 유동응력-변형률 속도 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같다.

Fig. 14에서 전체 면적 ( $\sigma\dot{\epsilon}$ )은 재료가 받는 총 에너지로 소성 변형에 의해 소모되는 에너지 (G-content)와 동적 회복 및 재결정 등 미세조직 변화의 내부 에너지 (J Co-content)의 합으로 표현되며 식 (2)와 같다.

$$P = \sigma\dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = G + J \quad (2)$$

식 (1)의 변형률 속도 민감도 (m)은 소재 내부의 미세조직 변화에 의해 에너지를 분산하는 효율의 물리적 의미를 갖으며 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\epsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\epsilon}} = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

주어진 온도와 변형을 속도에서 J항은 식 (4)와 같이 표현되고  $m=1$ 일 때 최대값을 가지며,  $J_{\max} = \sigma\dot{\epsilon}/2$  이다.

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\epsilon} \quad (4)$$

재료의 가공성이나 가공 효율을 효과적으로 극대화시키기 위해서는 외부에서 받는 에너지가 열적 방출보다 미세조직 변화에 소모되는 것이 유리하다. 이러한 소성 변형에 대해 평가하는 인자는 에너지 분산 효율 (Efficiency of power dissipation),  $\eta$  로 식 (5)와 같이 정의되며 값이 클수록 재료가 받는 에너지는 동적 회복 및 재결정 등에 소모된다.

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (5)$$

동적재료모델에 근거하여 고온변형 동안 유동 불안정 조건에 관한 인자는 Ziegler에 의해 제시되었으며 다음 식 (6)을 통해 조건을 정의할 수 있으며 평가한다.[33]

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln(m/(m+1))}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (6)$$

Ziegler parameter ( $\xi(\dot{\epsilon})$ ) 값이 음의 값을 가질 때 불안정한 소성 유동을 보이는 영역으로 분류된다. Prasad와 Malas 등에 의하면 변형 효율이 낮은 경우 크랙, 전단 밴드 및 국부 변형 등이 발생하기 쉬운 소성 불안정 영역으로 구분된다.[32,34]

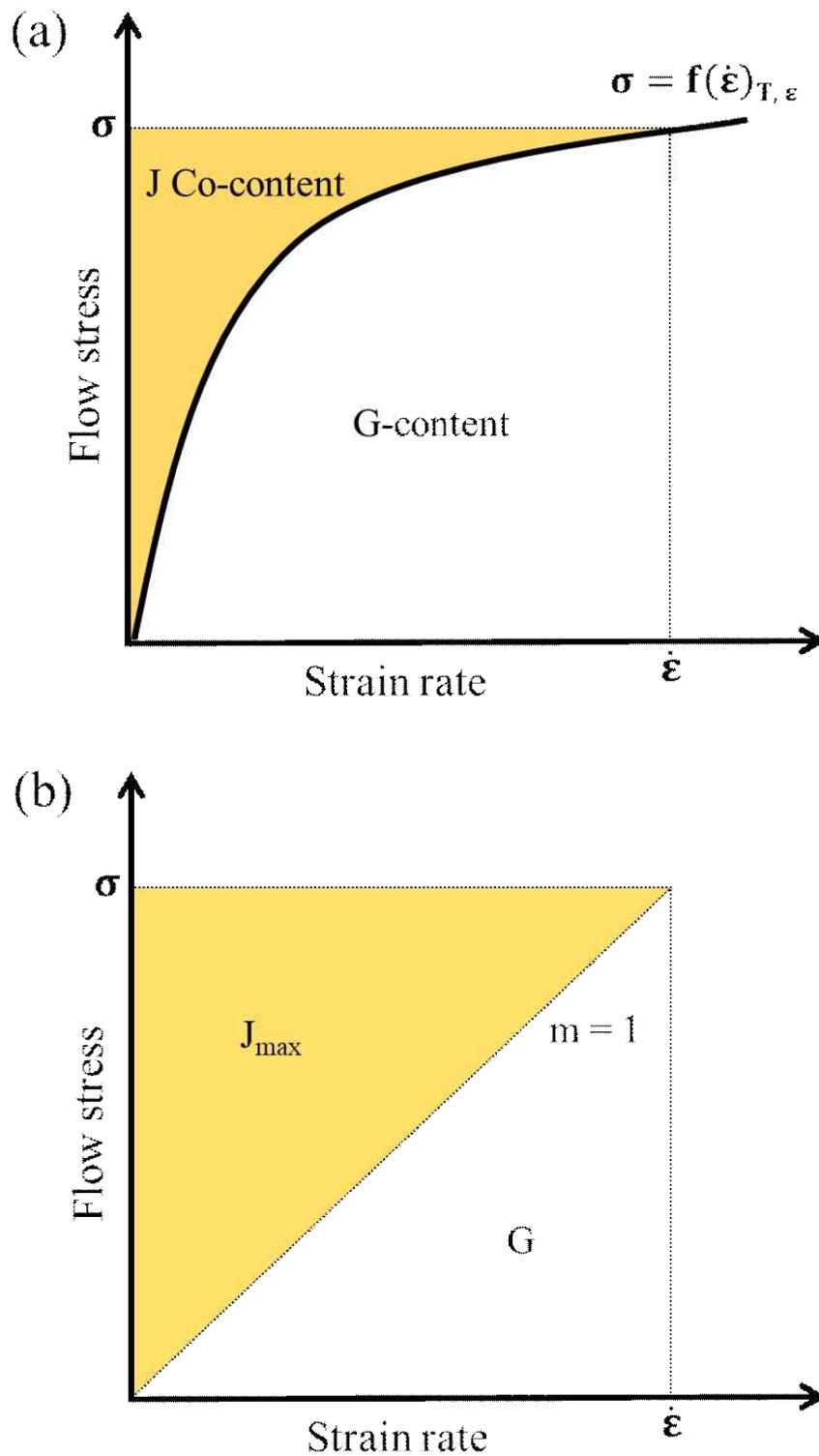


Fig. 14. Schematic diagrams of dynamic constitutive equation at constant temperature and strain; (a) A viscoplastic solid following power law behavior and (b) An ideal linear dissipator.

### 제 3 절. 공정지도

공정지도 (Processing map)는 동적재료모델을 기반으로 작성되는데 에너지 분산 효율과 Ziegler parameter를 통해 각각 얻어지는 에너지 분산 지도 (Power dissipation map)와 Instability map을 중첩시켜 나타내는 것이다. 에너지 분산 지도는 미세조직 변화 등을 통해 특정한 조건에서의 소성 변형 과정과 비가역적 반응으로 여기는 열역학적 고려를 바탕으로 소성 변형 안정성 여부를 파악하는데 활용된다.[35]

Instability map은 주어진 온도와 변형률 속도에 따른 Ziegler parameter 값에 의해 작성되는데 양의 부호를 가지는 영역과 음의 부호를 가지는 영역으로 구분되며 음수인 영역에 해당하는 온도와 변형률 속도 조건에서 소성 가공 시 불안정한 소성 거동이 일어날 수 있음을 의미한다.

Fig. 15에서는 250등급 마레이징강의 공정지도를 보여준다.[36] 에너지 분산 지도와 그늘진 영역의 Instability map을 중첩시켜 나타낸 공정지도로 그늘진 소성 불안정 영역을 제외하고 분산 효율이 좋은 성형 조건은 모든 온도에서 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 이하로 도출된다. 이처럼 안전한 열간 성형 조건 도출이 용이하지만, 아다마이트 주강에 대한 공정지도와 Instability map이 작성된 사례는 없다.

본 논문에서는 온도와 변형률 속도 조건에 따른 아다마이트 주강의 안전한 열간 성형 조건을 도출하기 위해 Instability map을 사용하였다.

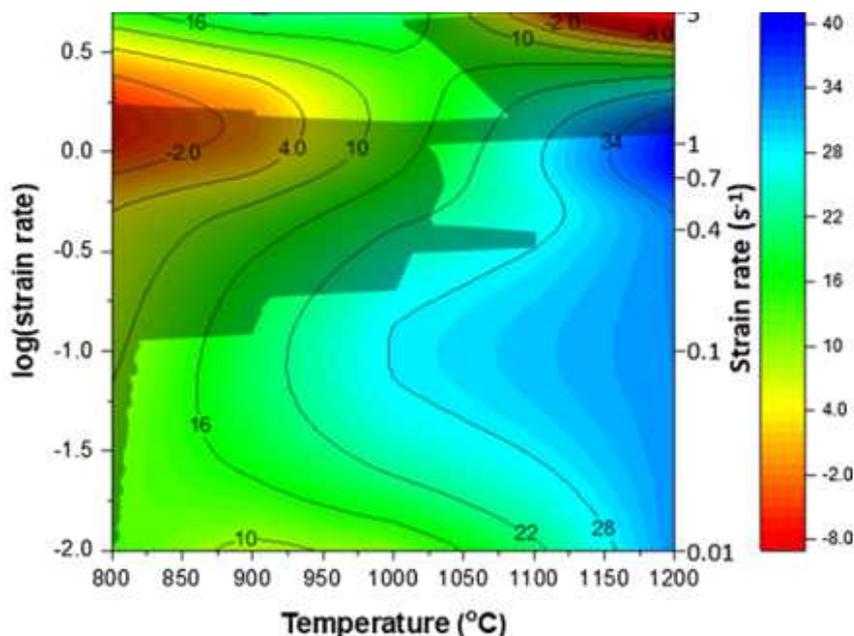


Fig. 15. A processing map of grade 250 maraging steel.[36]

# 제 3 장. 1200℃ 가열온도에 의한 아다마이트 주강의 고온변형거동

## 제 1 절. 서론

정적주조법을 통해 제조되는 열간압연용 아다마이트 워크롤의 경도, 강도, 인성, 내마모성 등의 특성 향상과 수명 증대를 위해 소성 변형을 적용한 연구는 제한적이다. 소성 변형 적용이 가능하다면 기존 아다마이트 주강롤 대비 우수한 기계적 특성뿐만 아니라 압연 산업에서의 생산성 향상이 가능할 것으로 기대된다.[20,21]

본 챕터에서는 가열온도 1200℃에서 아다마이트 주강에 소성 변형 적용이 가능하면서도 안정한 열간 성형 조건을 도출하고자 한다. 아다마이트 주강을 초기에 1200℃까지 가열 후, 다양한 압축시험온도와 변형률 속도에 따라 고온압축시험을 통해 고온 가공성을 평가하였다.

## 제 2 절. 실험재료 및 방법

### 1. 아다마이트 주강

Fig. 16에서는 본 연구에서 사용한 아다마이트 주강 원소재를 나타내었다. 고온압축시험을 실시하기 전 시료 재취는 현대제철에서 제작한 실제 아다마이트 주강롤에서 샘플링 후 사용하였다. Table 6에서는 아다마이트 주강의 화학 성분을 나타내었다. GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy)를 이용하여 5회 반복 측정 후, 일반적인 아다마이트 소재의 화학 성분 스펙과 함께 비교하였다. 아다마이트 주강의 화학성분은 1.58wt% 탄소를 함유하고 0.36wt%Si, 0.79wt%Mn, 1.08wt%Cr, 및 0.25wt%Mo으로 확인되었다. 이는 일반적인 아다마이트 소재의 화학 성분 스펙 범위에 포함된다.



Fig. 16. The as-received adamite cast steel.

Table 6. Chemical compositions of adamite cast steel (wt%).

	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
Spec.[7]	1.40~2.00	0.30~0.70	0.50~1.00	0.80~1.60	0.20~0.50	≤0.035	≤0.030
Results	1.58	0.36	0.79	1.08	0.25	0.035	0.04

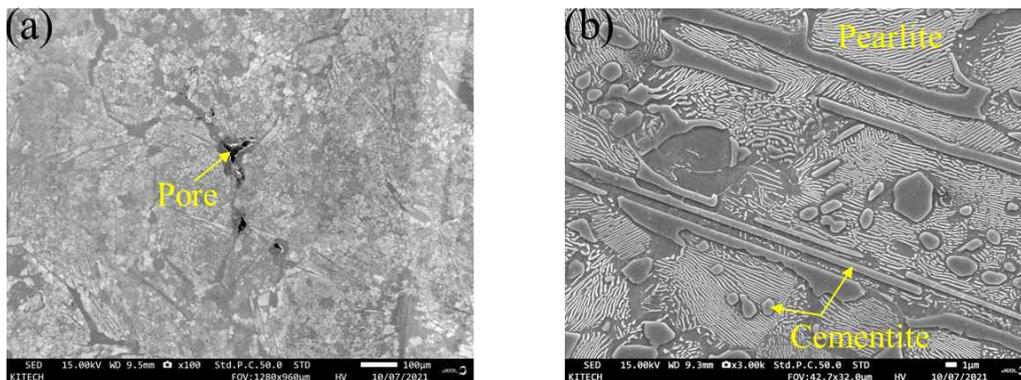


Fig. 17. SEM images of adamite cast steel;  
(a) Low-magnification (x100) and (b) High-magnification (x3000).

Fig. 17에서는 아다마이트 주강의 FE-SEM으로 관찰한 고온압축시험 전 미세조직을 나타내었다. 아다마이트 주강의 미세조직 관찰결과, Fig. 17 (a)에서는 기존 주조 공정으로 제조되는 과정에서 생성된 기공이 관찰되었다. Fig. 17 (b)에서는 전형적인 펄라이트 기지 조직이 관찰되며 펄라이트 기지 내에서 시멘타이트는 구형 형태의 시멘타이트와 층상 형태의 시멘타이트로 관찰되었다.

Fig. 18에서는 아다마이트 주강의 미세조직에서 관찰되는 시멘타이트의 EDS 성분 분석 결과를 나타내었다. Fig. 18 (a)의 구상 시멘타이트와 Fig. 18 (b)의 층상 시멘타이트는 EDS 성분 분석결과, 철과 탄소가 주요 원소이며, M(=Fe, V, Mo, Mn, Cr) 및 C의 원자 백분율의 비는 대략 3:1 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )로 확인되었다.

Fig. 19에서는 아다마이트 주강의 고온압축시험편에서 관찰되는 입계 탄화물의 EDS 성분 분석 결과를 나타내었다. Fig. 19 (a)는 압축시험온도  $1100^\circ\text{C}$ , 변형률 속도  $0.001\text{s}^{-1}$  조건의 시험편으로 EDS 성분 분석결과, 입계를 따라 형성된 탄화물은 철과 탄소가 주요 원소이며, M(=Fe, V, Mo, Cr) 및 C의 원자 백분율의 비는 대략 3:1로 확인되었다. Fig. 19 (b)는 압축시험온도  $800^\circ\text{C}$ , 변형률 속도  $0.001\text{s}^{-1}$  조건의 시험편으로 EDS 성분 분석결과, Fig. 33 (a)와 마찬가지로 입계를 따라 형성된 탄화물은 철과 탄소가 주요 원소이며, M(=Fe, V, Mo, Cr) 및 C의 원자 백분율의 비는 대략 3:1로 확인되었다.

아다마이트 주강 원소재에서 관찰되는 구상 및 층상 형태의 시멘타이트와 고온 압축시험편에서 관찰되는 입계 탄화물의 EDS 성분 분석 결과는 서로 유사하며, 신뢰성을 확인하기 위해 EBSD의 Phase map 분석을 실시하였으며 Fig. 20에서는 EBSD의 Phase map 분석 결과를 나타내었다.

Fig. 20은 압축시험온도  $1000^\circ\text{C}$ , 변형률 속도  $0.001\text{s}^{-1}$  조건의 시험편이다. Phase map에서 녹색 영역은 BCC, 적색 영역은  $\text{Fe}_3\text{C}$  상으로 구분되는데 입계를 따라 형성된 탄화물은  $\text{Fe}_3\text{C}$  상으로 확인되며, 아다마이트 주강의 고온압축시험 후 형성된 탄화물은 아다마이트 주강의 미세조직에서도 관찰된 시멘타이트와 동일하게 관찰되었다.

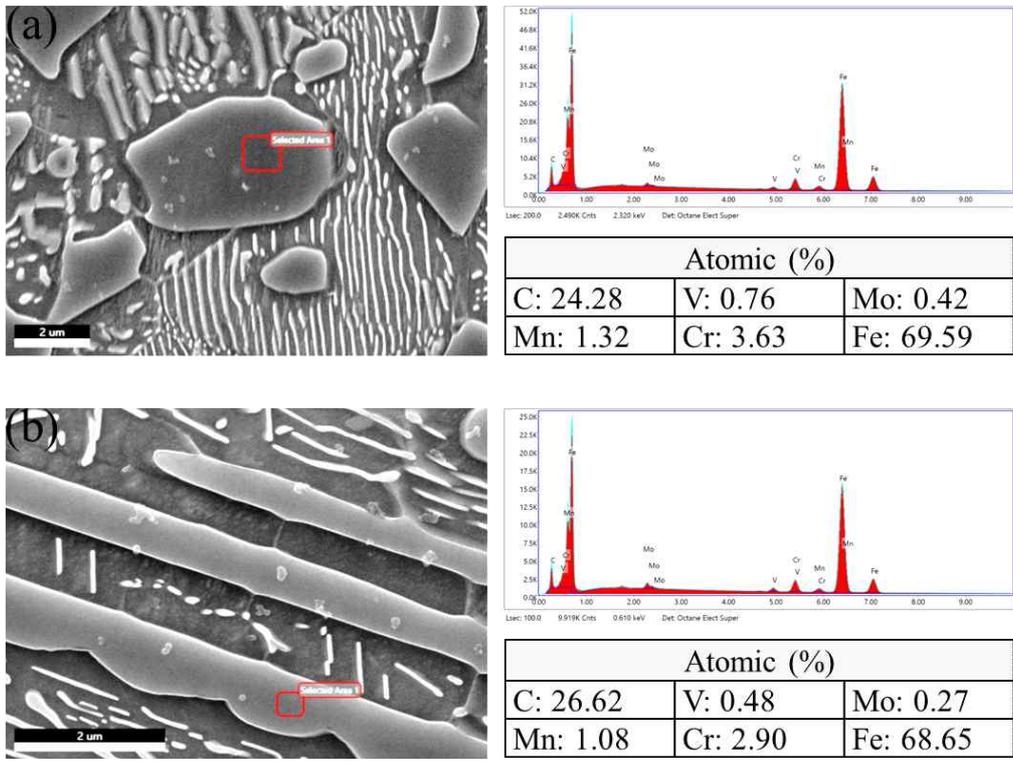


Fig. 18. EDS results of (a) Spherical cementite and (b) Lamellar cementite.

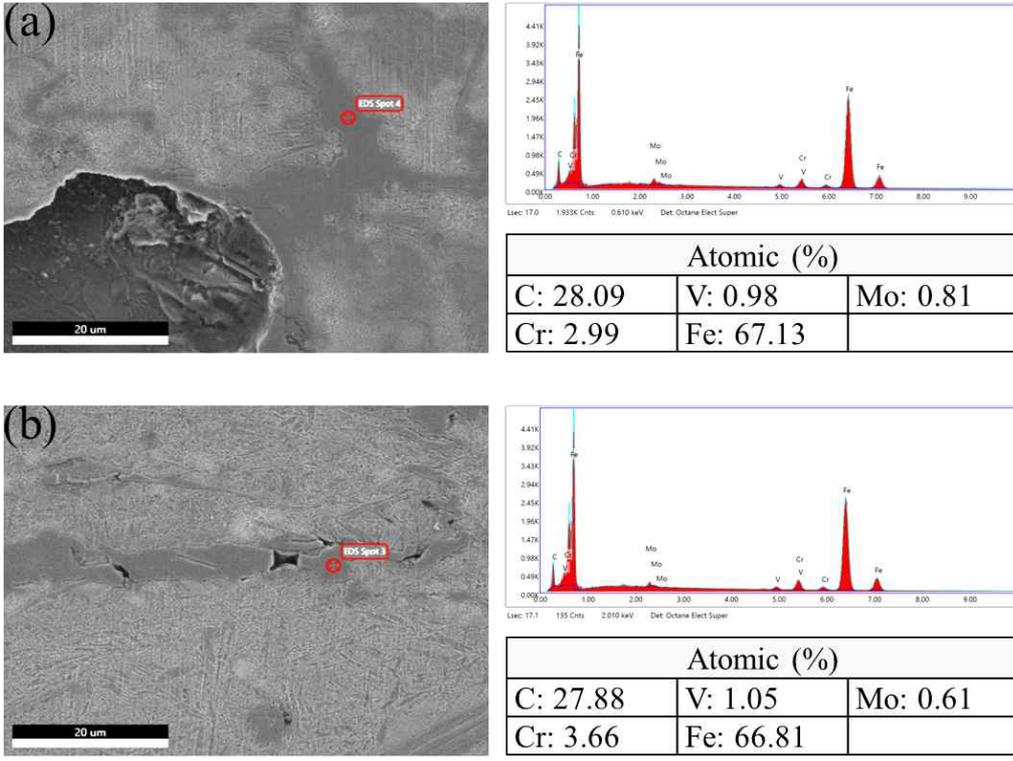


Fig. 19. EDS results of intergranular carbide; (a) 1100°C, 0.001s<sup>-1</sup> and (b) 800°C, 0.001s<sup>-1</sup>.

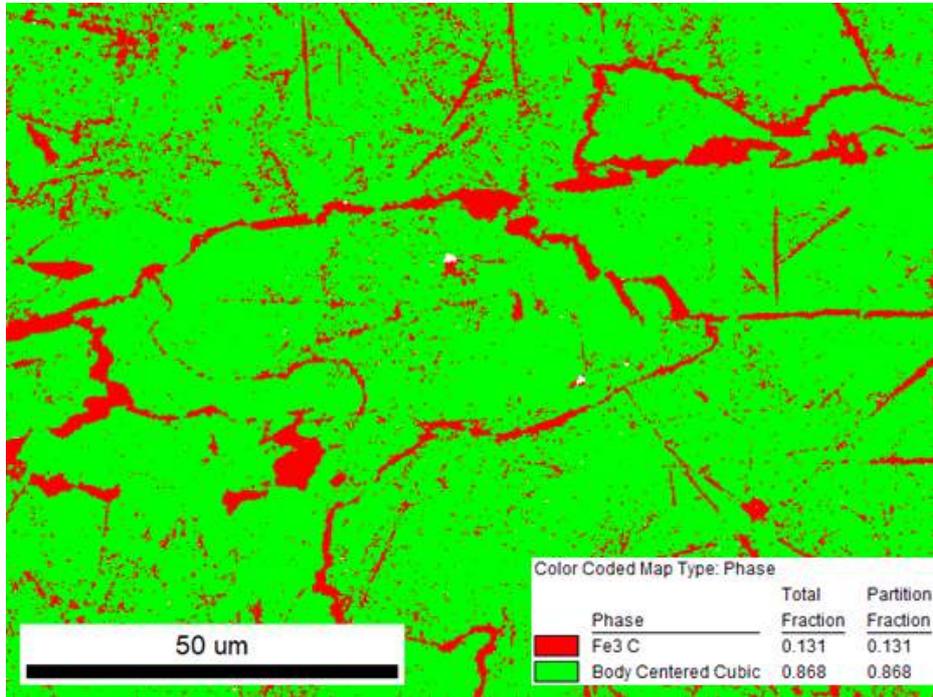


Fig. 20. A phase map result of the hot compressed specimen at the test temperature of 1000°C with the strain rate of 0.001s<sup>-1</sup>.

## 2. 고온압축시험

아다마이트 주강의 고온 가공성을 평가하고 고온변형 시 유동응력 및 변형률에 대한 특성을 알아보기 위해 Gleeble 3800 장비 (Fig. 21)를 사용하여 진공분위기에서 고온압축시험을 실시하였다. 아다마이트 주강에서 샘플링한 시료는 고온압축시험을 위해 직경 10mm, 높이 12mm의 원통형 시험편 (Fig. 22)으로 가공하였고, 가열 및 압축하는 과정에서는 금형의 접촉면과 마찰을 줄이기 위해 시험편 상하부에 탄탈륨 시트를 부착하였다.



Fig. 21. Gleeble 3800 system.

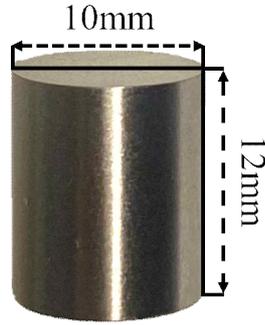


Fig. 22. Preparation of specimens for the hot compression test.

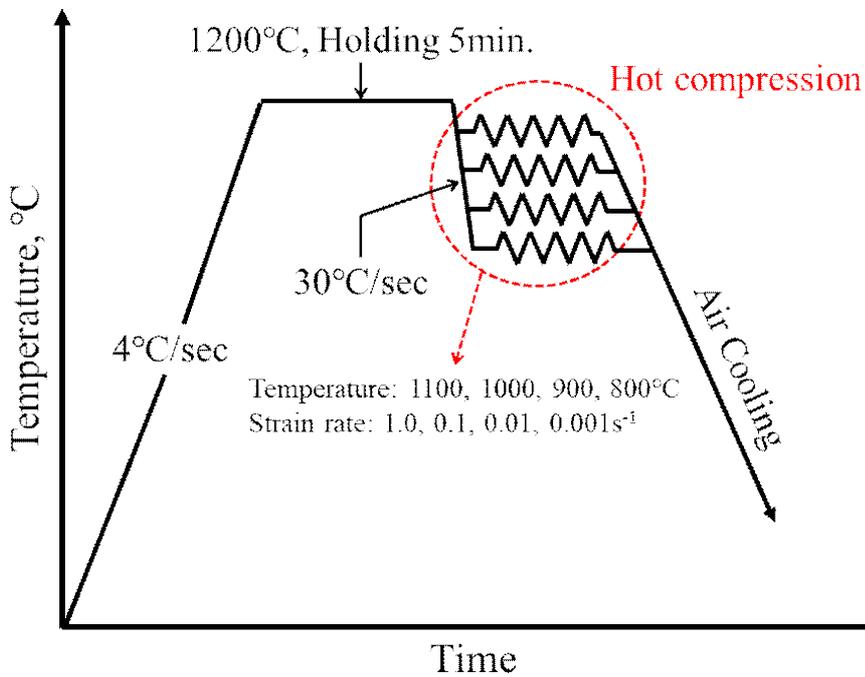


Fig. 23. A schematic diagram of the hot compression test by Gleeble 3800.

Fig. 23에서는 고온압축시험의 열처리 사이클에 대한 모식도를 나타내었다. 4°C/sec의 승온 속도로 1200°C까지 가열 후, 5분동안 유지하고 압축시험온도 1100°C, 1000°C, 900°C 및 800°C까지 냉각 속도 30°C/sec로 각각 급속 냉각하여 모든 압축시험온도 조건에서 변형률은50%로 동일하게 압축하였다. 이때 모든 압축시험온도 조건에서 변형률 속도는 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup>, 0.001s<sup>-1</sup>의 네 가지 조건으로 각각 달리하여 실시하였으며 압축 완료 후 장비 내에서 공냉 처리하였다.

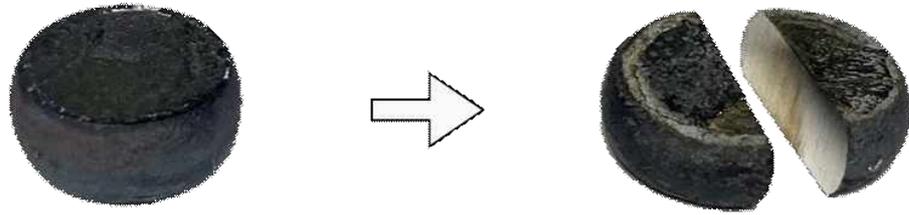


Fig. 24. A cutting method of the hot compressed specimen through the low speed cutting machine.

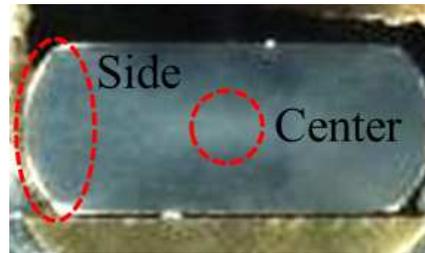


Fig. 25. Observed cross-sectional positions of the hot compressed specimen.

모든 압축시험온도와 각 변형률 속도에 따른 고온압축시험편의 외관상 표면 결함 발생 유무를 관찰하기 위해 저속 절단기를 사용하여 압축 방향과 수평인 방향으로 절단한 후 (Fig. 24), 디지털 카메라를 통해 시험편의 외부형상을 촬영하였다.

미세조직 분석은 고온압축시험편의 단면을 연마한 뒤, 2% Nital 용액 (2ml HNO<sub>3</sub> + 98ml Ethanol)으로 에칭을 한 이후, FE-SEM을 활용하여 단면의 외곽부, 외곽 인접부와 중심부 (Fig. 25)를 관찰하였다.

### 제 3 절. 결과

#### 1. 고온압축시험편 외부형상

아다마이트 주강의 고온압축시험 후 시험편의 외부형상을 통해 외관상 표면에서의 결함 발생 유무를 관찰하였다. 고온압축시험편의 압축 방향과 수평인 방향으로 절단 후, 모든 압축시험온도와 변형률 속도에 따른 각 시험편의 외부형상을 함께 비교하였다.

Fig. 26에서는 가열온도 1200℃에서 아다마이트 주강의 고온압축시험 후 외부형상 이미지를 나타내었다. 가장 높은 압축시험온도 1100℃ 조건에서는 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되는데 변형률 속도가 0.001~1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 심하게 관찰된다. 압축시험온도 1000℃ 조건에서는 압축시험온도 1100℃ 조건과는 다르게 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 표면 터짐이나 크랙은 관찰되지 않는다. 압축시험온도 900℃ 조건에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 마찬가지로 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 크랙 등 결함이 관찰되지 않는다. 가장 낮은 압축시험온도 800℃ 조건에서도 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건과 마찬가지로 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 크랙 등 결함이 관찰되지 않는다.

일반적으로 온도가 높을수록 열간 성형이 잘 되어 하는데 아다마이트 주강에서는 반대 경향이 확인된다. 고온 영역인 압축시험온도 1100℃ 조건에서 표면 터짐과 크랙이 발생하고 0.001~1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 심하게 관찰된다. 이러한 이유는 아다마이트 주강을 고온변형 시 1100℃ 조건에서는 부적합하다고 판단되며, 제3절 제4항에서 상세히 다루도록 하겠다.

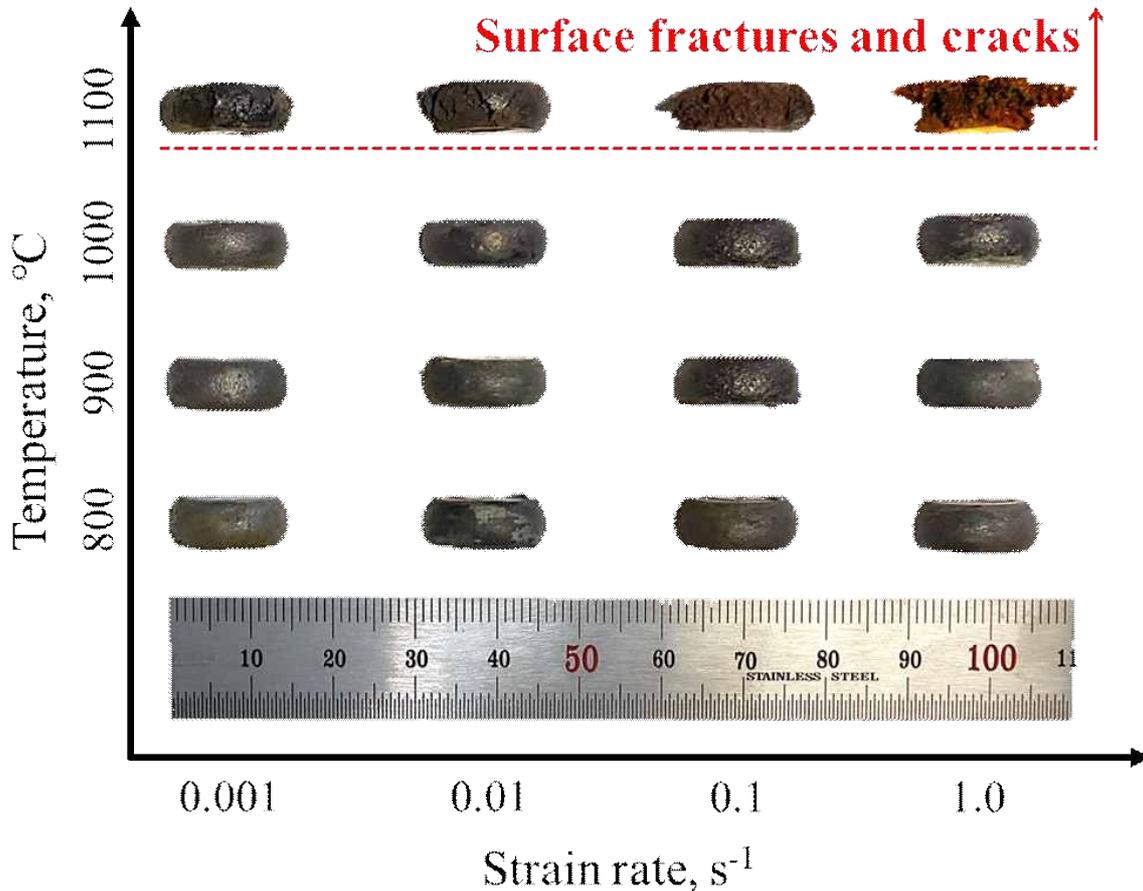


Fig. 26. Appearances of the hot compressed specimens with the heating temperature of 1200°C.

## 2. 고온 유동응력-변형을 선도

Fig. 27에서는 아다마이트 주강의 변형을 50% ( $\Delta H/H_0$ ), 가열온도 1200°C, 압축 시험온도 1100~800°C의 구간과 변형률 속도 1.0~0.001s<sup>-1</sup>의 범위에서 얻어진 고온 유동응력-변형을 선도를 나타내었다. 압축시험온도 1100°C 조건 (a)에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 최대 유동응력 값은 56.90Mpa, 49.38Mpa, 37.17Mpa 및 23.65Mpa이다. 압축시험온도 1000°C 조건 (b)에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 최대 유동응력 값은 132.92Mpa, 97.47Mpa, 65.20Mpa 및 47.67Mpa이다. 압축시험온도 900°C 조건 (c)에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 최대 유동응력 값은 207.90Mpa, 160.83Mpa, 109.76Mpa 및 76.19Mpa이다. 압축시험온도 800°C 조건 (d)에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 최대 유동응력 값은 318.24Mpa, 284.40Mpa, 213.11Mpa 및 168.46Mpa이다.

아다마이트 주강은 가열온도 1200°C에서 압축시험온도가 1100°C, 1000°C, 900°C 및 800°C로 감소하고 변형률 속도가 0.001s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup> 및 1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 유동응력이 증가한다. 또한, 일반적으로 초기에 압축하는 단계에서는 가공경화 (Work hardening)에 의해 응력이 증가하다가 압축이 진행됨에 따라 최대 응력에 도달한 후, 동적 재결정으로 인해 유동응력이 감소하거나 가공경화 현상과 동적 재결정의 연화 (Dynamic softening) 현상이 평형을 이뤄 일정하게 유지되는 정상상태를 나타낸다.[37-39] 아다마이트 소재의 경우, 압축시험온도 1000°C와 900°C 조건에서는 최대 응력에 도달한 후, 변형률 속도와 관계없이 정상상태를 나타내는 반면, 압축시험온도 1100°C, 변형률 속도 0.1s<sup>-1</sup> 이상인 조건과 압축시험온도 800°C에서 모든 변형률 속도 조건에서는 최대 응력에 도달한 후, 유동응력이 감소한다.

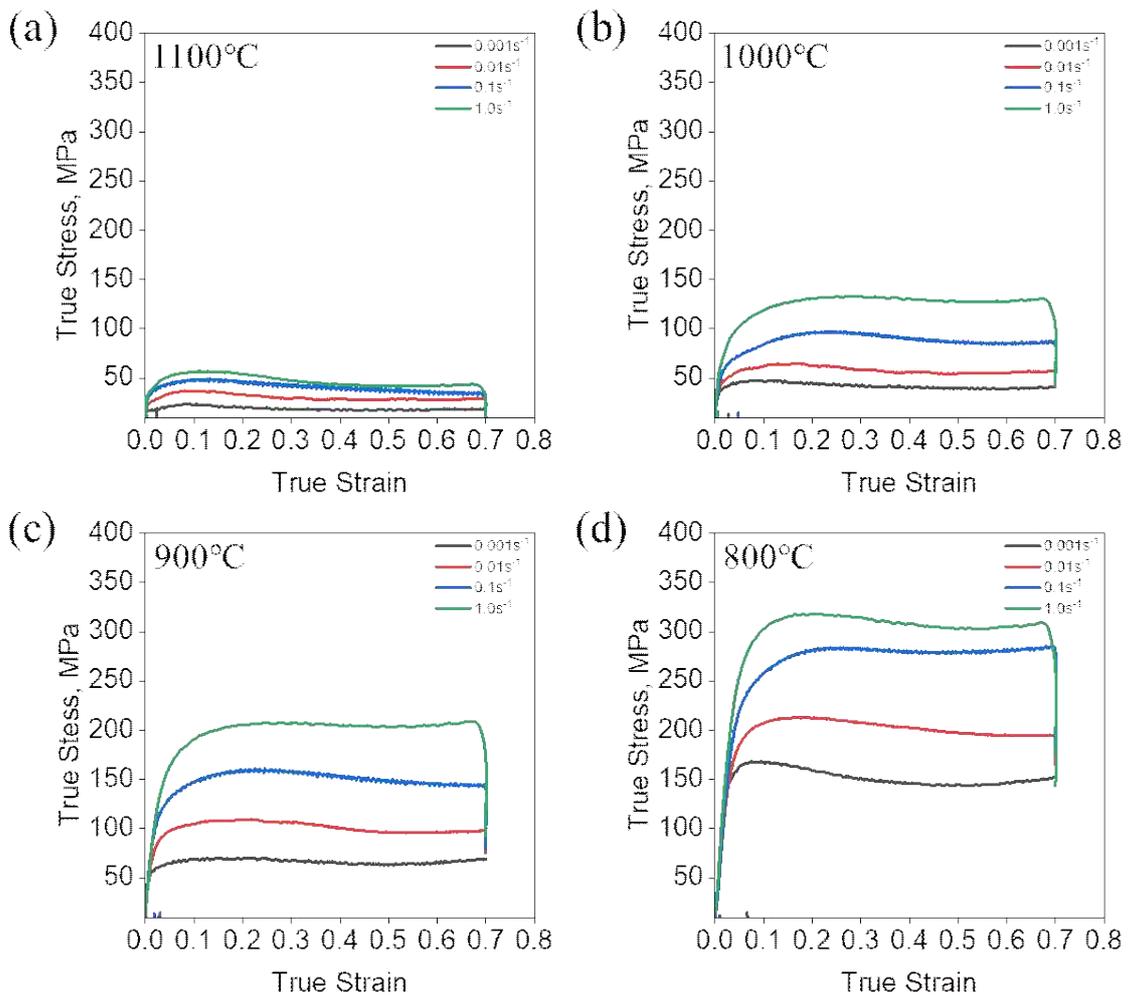


Fig. 27. Flow stress-strain curves obtained by the hot compression test with the heating temperature of 1200°C; The test temperature of (a) 1100°C, (b) 1000°C, (c) 900°C, and (d) 800°C.

### 3. Instability map

가열온도 1200℃, 변형률 50% 조건에서 모든 압축시험온도와 각 변형률 속도에 따른 아다마이트 주강의 Instability map을 작성하기 위해 앞서 제3절 제2항에서 압축시험을 통해 얻은 고온 유동응력-변형률 선도를 이용하여 동적재료모델을 기반으로 계산하였다.

#### 3-1. 유동응력

Table 7에서는 가열온도 1200℃, 변형률 50% 조건의 변형률 속도 민감도를 계산하기 위해 각 변형률 속도에 따른 유동응력 값을 작성하여 나타내었다. 압축시험온도가 1100℃, 1000℃, 900℃ 및 800℃로 감소하고 변형률 속도가 0.001s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup> 및 1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 유동응력 값은 증가하는 경향을 보인다.

Table 7. Flow stress values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200℃.

Temp. (°C)	Strain rate (s <sup>-1</sup> )	Flow stress (σ)
1100	1.0	38
	0.1	32
	0.01	29
	0.001	19
1000	1.0	118
	0.1	86
	0.01	57
	0.001	41
900	1.0	193
	0.1	144
	0.01	98
	0.001	69
800	1.0	288
	0.1	283
	0.01	195
	0.001	151

3-2. 변형률 속도 민감도

Fig. 28에서는 가열온도가 1200℃, 변형률이 50%인 조건에서 각 압축시험온도 1100℃, 1000℃, 900℃ 및 800℃와 변형률 속도 0.001s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup> 및 1.0s<sup>-1</sup>에 따른 유동응력 값에 자연로그를 취하고 기울기를 계산하기 위해 곡선을 그려 나타내었다.

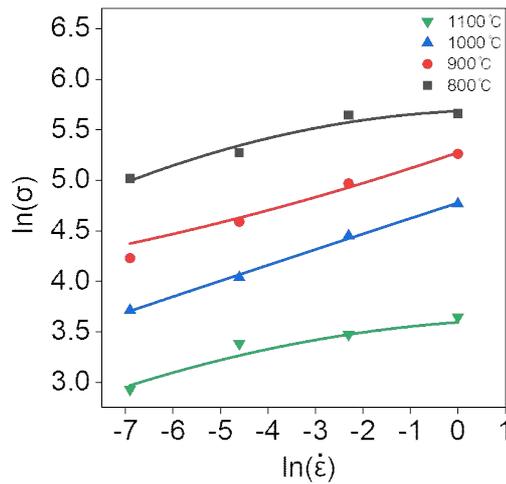


Fig. 28.  $\ln(\sigma)$  vs.  $\ln(\dot{\epsilon})$  plots of the hot compressed adamite obtained at the strain of 50% with the heating temperature of 1200℃.

Table 8. Strain rate sensitivity values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200℃.

Temp. (°C)	Strain rate (s <sup>-1</sup> )	Strain rate sensitivity (m)
1100	1.0	0.006
	0.1	0.067
	0.01	0.128
	0.001	0.129
1000	1.0	0.153
	0.1	0.154
	0.01	0.156
	0.001	0.158
900	1.0	0.130
	0.1	0.144
	0.01	0.158
	0.001	0.176
800	1.0	0.022
	0.1	0.074
	0.01	0.126
	0.001	0.127

Table 8에서는 가열온도 1200℃, 변형률 50% 조건에서 모든 압축시험온도와 각 변형률 속도에 따른 변형률 속도 민감도 값을 나타내었다. 변형률 속도 민감도는 제2장 제2절의 식 (3)을 통해 계산되었다. 모든 압축시험온도 1100℃, 1000℃, 900℃ 및 800℃ 조건에서는 변형률 속도가 0.001s<sup>-1</sup>에서 0.01s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup> 및 1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 변형률 속도 민감도 값은 감소한다.

### 3-3. Ziegler parameter

Table 9에서는 가열온도 1200℃, 변형률 50% 조건에서 모든 압축시험온도와 각 변형률 속도에 따른 Ziegler parameter 값을 나타내었다. Ziegler parameter는 제2장 제2절의 식 (6)을 통해 계산되었다. 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 Ziegler parameter 값은 -0.532, -0.362, -0.192 및 -0.021이다. 압축시험온도 1000℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 Ziegler parameter 값은 0.148, 0.150, 0.152 및 0.154이다. 압축시험온도 900℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 Ziegler parameter 값은 0.088, 0.106, 0.124 및 0.142이다. 압축시험온도 800℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 Ziegler parameter 값은 -0.525, -0.290, -0.101 및 -0.010이다.

압축시험온도 1100℃와 800℃ 조건의 Ziegler parameter 값은 변형률 속도와 관계 없이 전부 음의 값을 가지며, 변형률 속도가 증가할수록 값이 낮아지는데 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건 대비 모든 변형률 속도 조건에서 상대적으로 낮게 계산된다.

Table 9. Ziegler parameter values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200°C.

Temp. (°C)	Strain rate (s <sup>-1</sup> )	Ziegler parameter (ξ)
1100	1.0	-0.532
	0.1	-0.362
	0.01	-0.192
	0.001	-0.021
1000	1.0	0.148
	0.1	0.150
	0.01	0.152
	0.001	0.154
900	1.0	0.088
	0.1	0.106
	0.01	0.124
	0.001	0.142
800	1.0	-0.525
	0.1	-0.290
	0.01	-0.101
	0.001	-0.010

### 3-4. 아다마이트 소재의 Instability map

Fig. 29에서는 계산한 Ziegler parameter 값을 통해 가열온도 1200°C, 변형률 50% 조건에서 작성된 아다마이트 소재의 Instability map을 나타내었다. Instability map에서 Ziegler parameter 값이 양수인 영역은 변형률 속도와 관계없이 약 1020°C부터 880°C까지로 소성 안정 영역으로 구분된다. 나머지 압축시험온도 1100°C와 800°C 조건의 Ziegler parameter 값은 변형률 속도와 관계없이 전부 음수이며 소성 불안정 영역으로 구분된다. 소성 안정 영역과 불안정 영역에 대한 구분은 Ziegler parameter 값에 의해 나뉘는데 Ziegler parameter 값이 음수인 소성 불안정 영역을 제외하면 가열온도 1200°C, 변형률 50%에서 아다마이트 소재의 안정한 열간 성형 조건은 변형률 속도와 관계없이 약 1020~880°C로 도출된다.

Ziegler parameter 값이 음수인 소성 불안정 영역에서는 크랙, 전단밴드 등 비정상 조직의 발생 가능성이 높다. 아다마이트 소재의 Instability map과 실제 미세조직의 상관관계를 확인하기 위해 제4절에서는 아다마이트 고온압축시험편의 단면 미세조직을 관찰하였다.

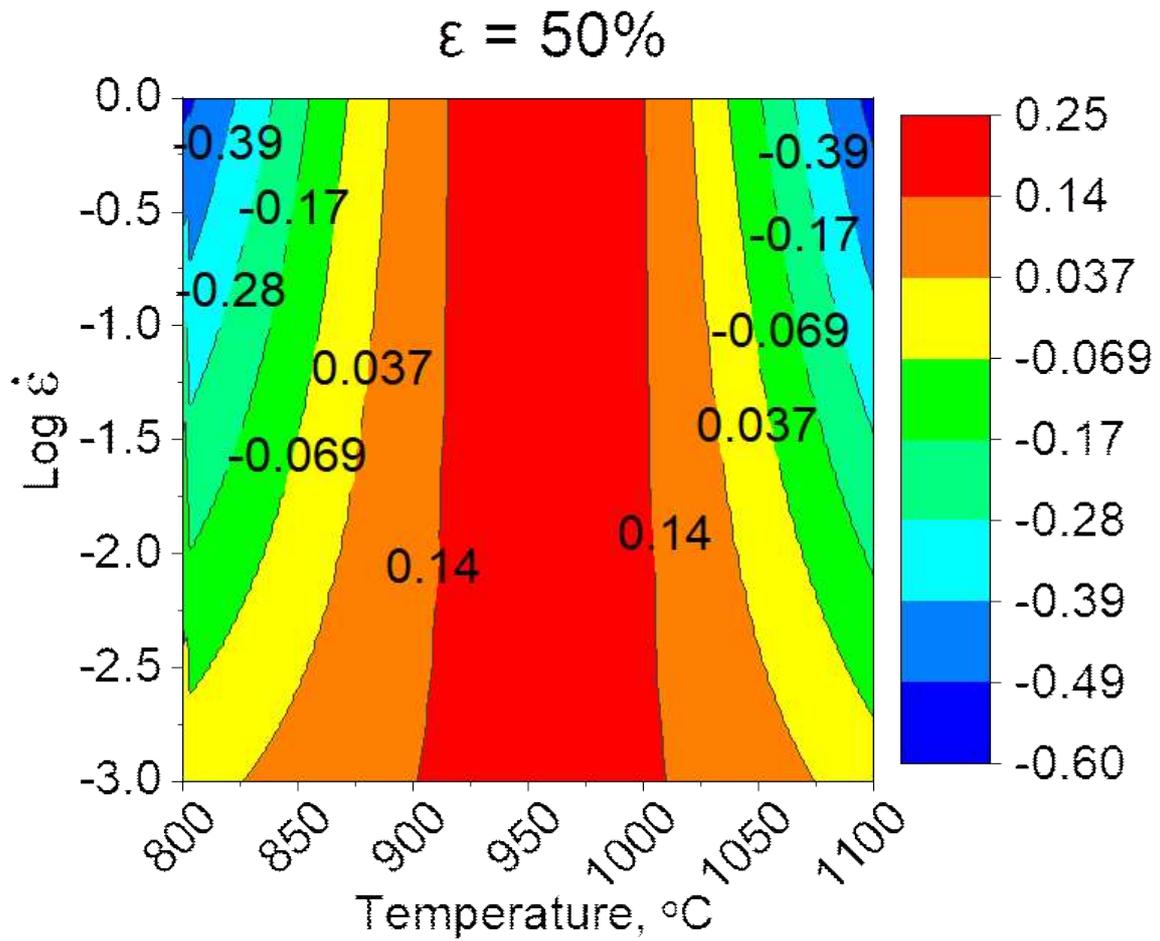


Fig. 29. An instability map obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200°C.

## 4. 미세조직 관찰

아다마이트 고온압축시험편의 미세조직과 앞서 제3절 제3항에서 동적재료모델에 의해 작성한 Instability map의 관계를 확인하기 위해 FE-SEM을 활용하여 고온압축 시험편의 단면 외곽부 (The bulged side of the cross-section), 단면 외곽 인접부 (Around the bulged side of the cross-section) 및 단면 중심부 (The center of the cross-section)의 미세조직을 저배율과 고배율에서 각각 관찰하였다.

### 4-1. 압축시험온도 1100℃ 조건 : 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 30에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 단면 외곽부 (a-1)에서 심한 표면 터짐 (Fracture)이 관찰되는데 표면 터짐이 발생한 단면 외곽 인접부 (a-2)에서는 입계를 따라 형성된 시멘타이트에서 국부 용융 (Partial melting)이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐과 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 함께 관찰된다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐이 관찰되는데 비교적 빠른 변형률 속도 대비 터짐의 정도가 덜하다. 단면 외곽 인접부 (d-2)에서는 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 또한, 표면 터짐과 국부 용융은 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가할수록 심하게 관찰된다.

제3절 제1항에서 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서는 압축시험온도 1100℃ 조건은 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되는데 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가할수록 심하게 확인된다. 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서는 표면 터짐이 발생한 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 함께 관찰되며, 국부 용융은 표면이 터지게 되는 현상에 기인한 원인으로 사료된다.

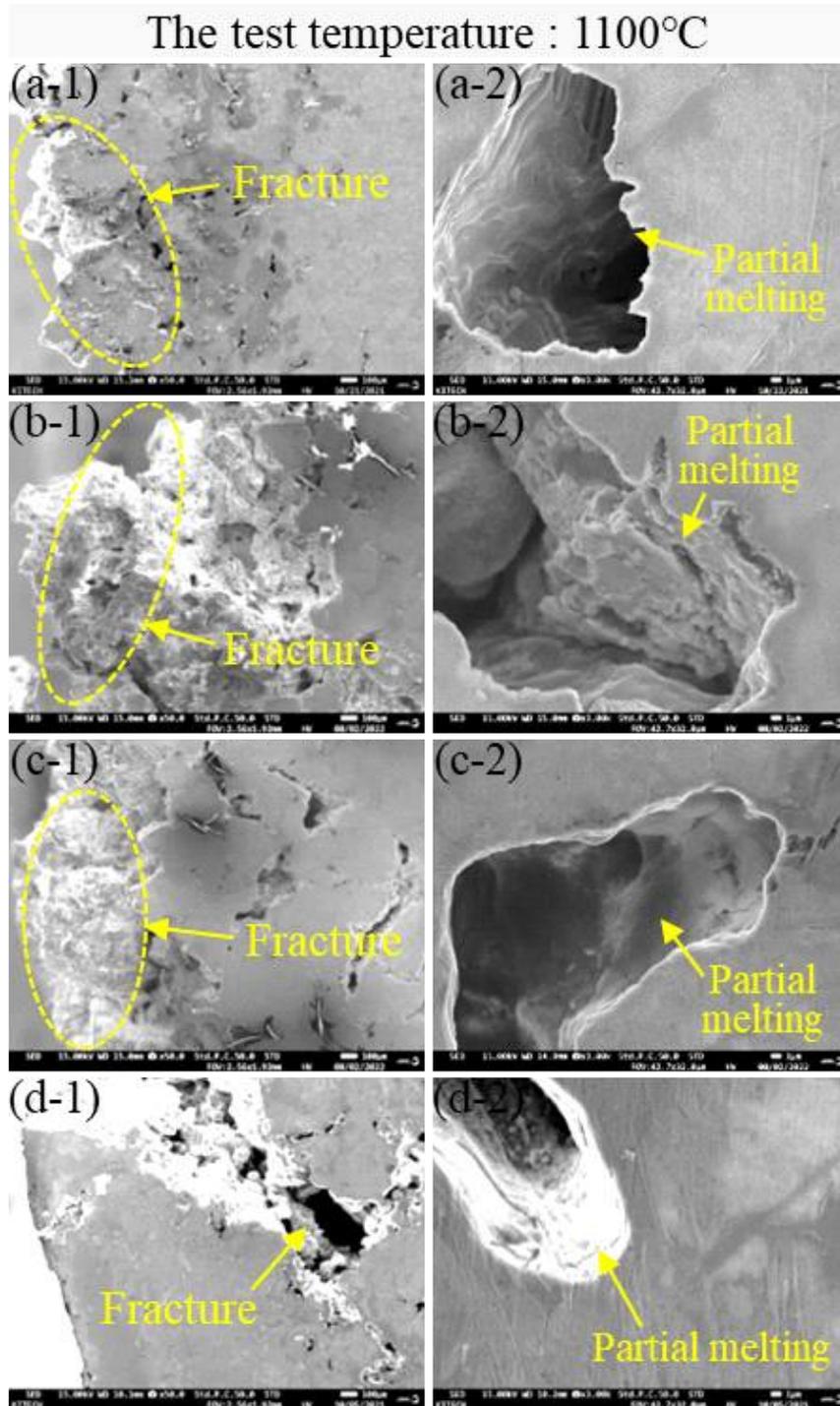


Fig. 30. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1200°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side.

4-2. 압축시험온도 1100℃ 조건 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 31에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인 1.0s<sup>-1</sup> 조건 (a)에서는 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 변형률 속도 0.1s<sup>-1</sup> (b)와 0.01s<sup>-1</sup> 조건 (c)에서는 1.0s<sup>-1</sup> 조건과 유사하게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 가장 느린 변형률 속도인 0.001s<sup>-1</sup> 조건 (d)에서도 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다.

압축시험온도 1100℃ 조건에서는 변형률 속도와 관계없이 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰되는데 단면 외곽 인접부에서 관찰되는 국부 용융 대비 크기와 정도가 덜한 이유에 대해서는 4-8에서 상세히 다루도록 하겠다.

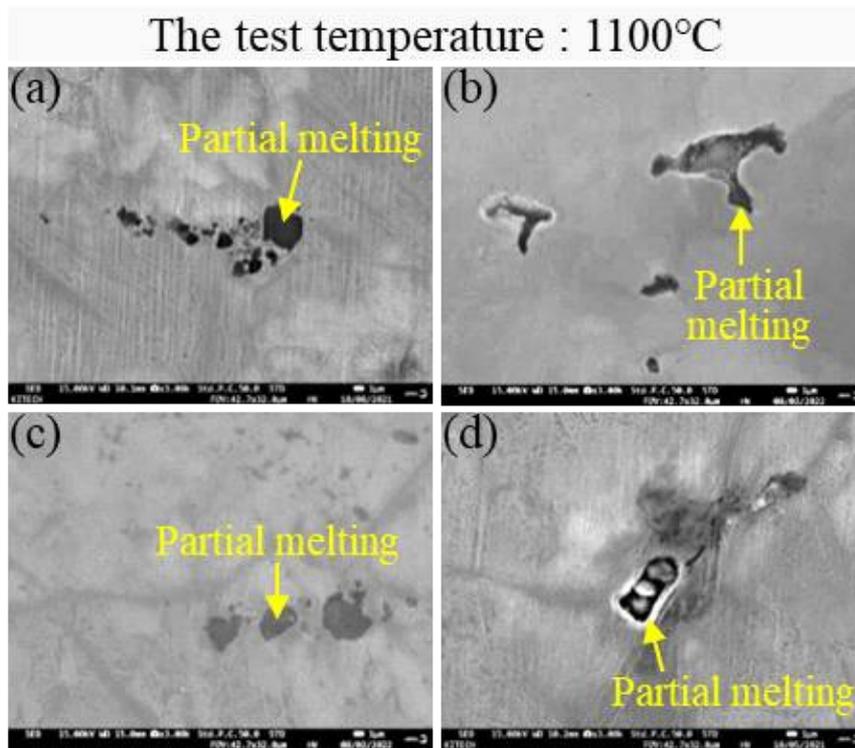


Fig. 31. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100℃ with the heating temperature of 1200℃; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>.

4-3. 압축시험온도 1000℃ 조건 : 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 32에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1000℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 압축시험온도 1100℃ 조건과 다르게 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐이 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서도 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐이나 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐이나 단면 외곽 인접부 (d-2)의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다.

제3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 압축시험온도 1000℃ 조건은 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 결함이 관찰되지 않는데 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서도 모든 변형률 속도 조건에서 결함은 관찰되지 않는다.

압축시험온도가 1100℃에서 1000℃로 낮아지면 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도와 관계없이 단면 외곽부에서 관찰된 표면 터짐과 단면 외곽 인접부에서 관찰된 국부 용융이 압축시험온도 1000℃ 조건에서는 모든 변형률 속도에서 관찰되지 않으며 미세조직은 건전하다.

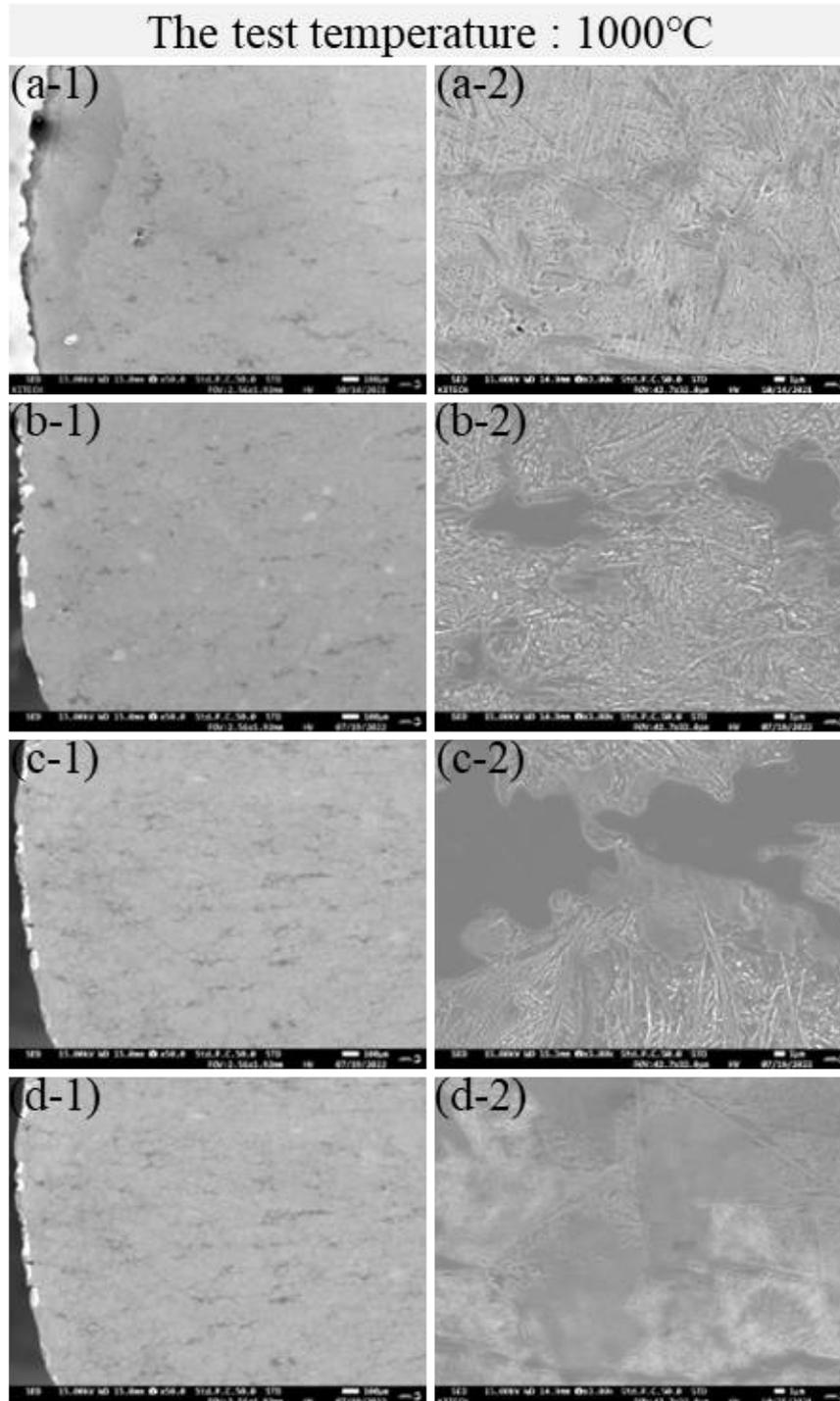


Fig. 32. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1000°C with the heating temperature of 1200°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side.

4-4. 압축시험온도 1000℃ 조건 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 33에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1000℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인 1.0s<sup>-1</sup> 조건 (a)에서는 압축시험온도 1100℃ 조건과 다르게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 변형률 속도 0.1s<sup>-1</sup> (b)와 0.01s<sup>-1</sup> 조건 (c)에서는 1.0s<sup>-1</sup> 조건과 유사하게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인 0.001s<sup>-1</sup> 조건 (d)에서도 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다.

압축시험온도가 1100℃에서 1000℃로 낮아지면 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도와 관계없이 단면 중심부에서 관찰된 국부 용융이 압축시험온도 1000℃ 조건에서는 모든 변형률 속도에서 관찰되지 않으며 미세조직은 건전하다.

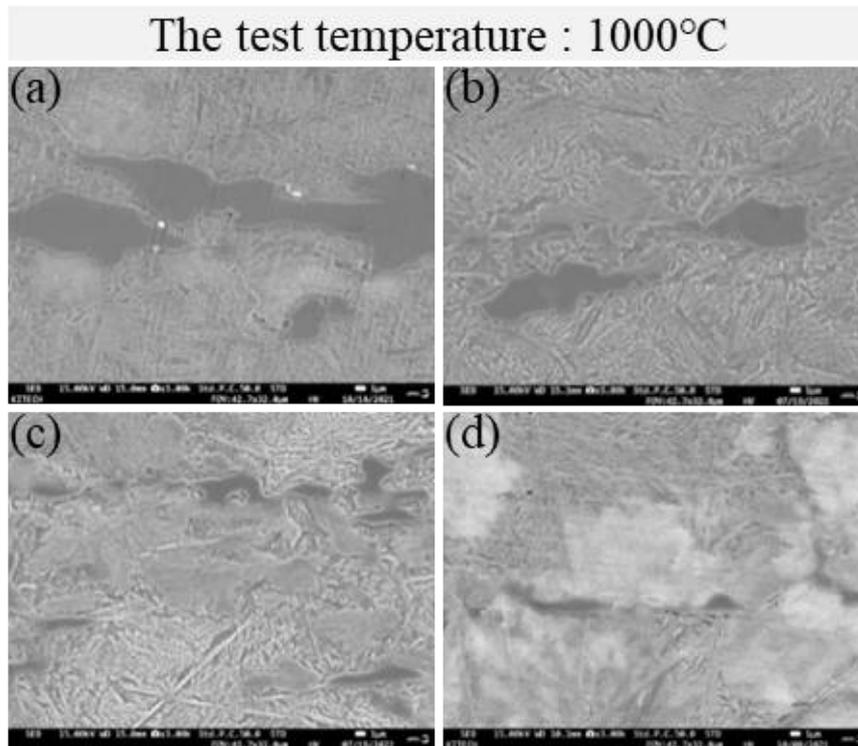


Fig. 33. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1000℃ with the heating temperature of 1200℃; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>.

4-5. 압축시험온도 900℃ 조건 : 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 34에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 900℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰 결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 마찬가지로 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐이 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서도 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐이나 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐이나 단면 외곽 인접부 (d-2)의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다.

제3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 압축시험온도 900℃ 조건은 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 결함이 관찰되지 않는데 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서도 모든 변형률 속도 조건에서 결함은 관찰되지 않는다.

압축시험온도가 1000℃에서 900℃로 낮아지더라도 압축시험온도 900℃ 조건에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 유사하게 모든 변형률 속도에서 미세조직은 건전하다.

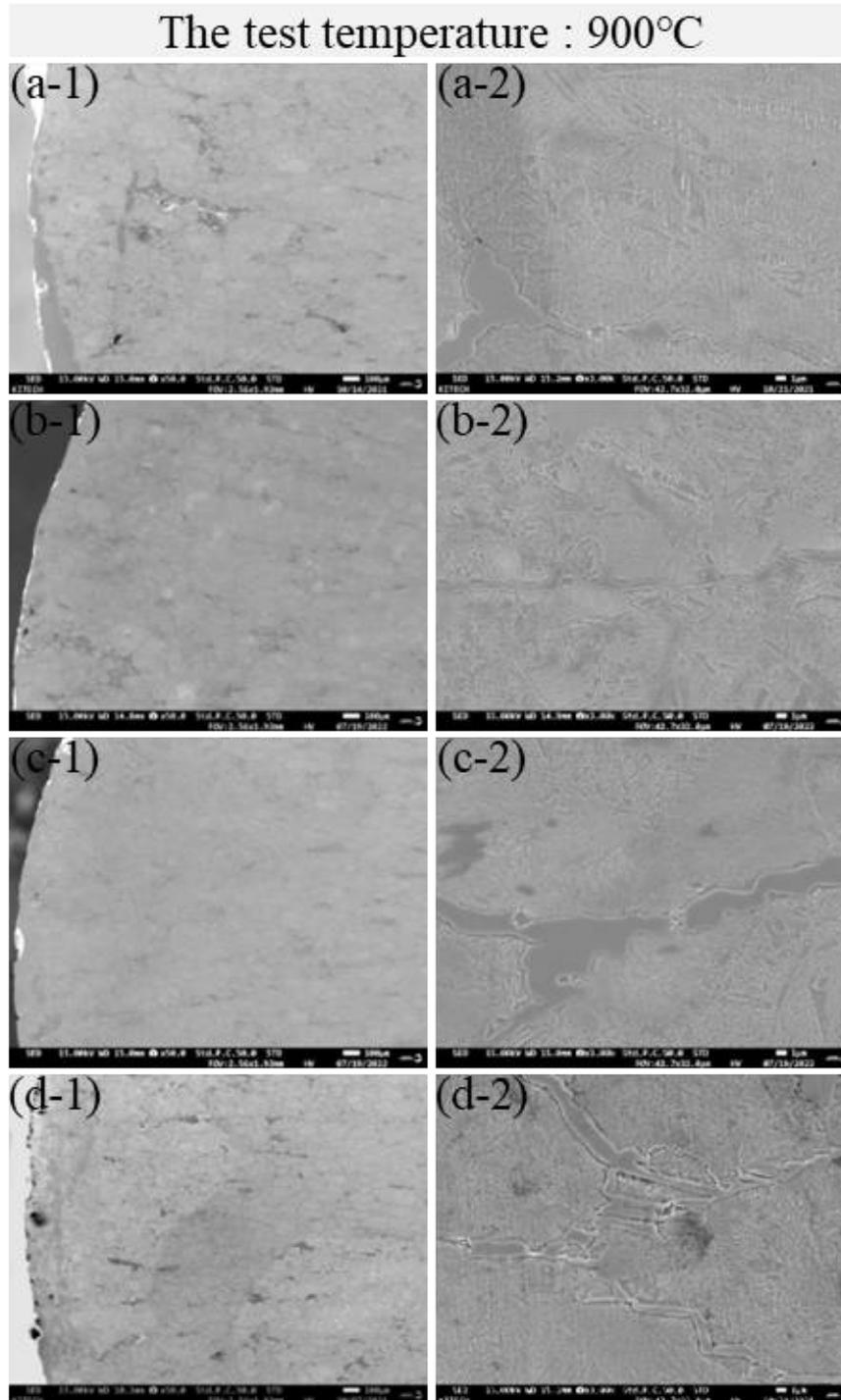


Fig. 34. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 900°C with the heating temperature of 1200°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side.

4-6. 압축시험온도 900℃ 조건 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 35에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 900℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인 1.0s<sup>-1</sup> 조건 (a)에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 마찬가지로 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 변형률 속도 0.1s<sup>-1</sup> (b)와 0.01s<sup>-1</sup> 조건 (c)에서는 1.0s<sup>-1</sup> 조건과 유사하게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인 0.001s<sup>-1</sup> 조건 (d)에서도 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다.

압축시험온도가 1000℃에서 900℃로 낮아지더라도 압축시험온도 900℃ 조건에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 유사하게 모든 변형률 속도에서 미세조직은 건전하다.

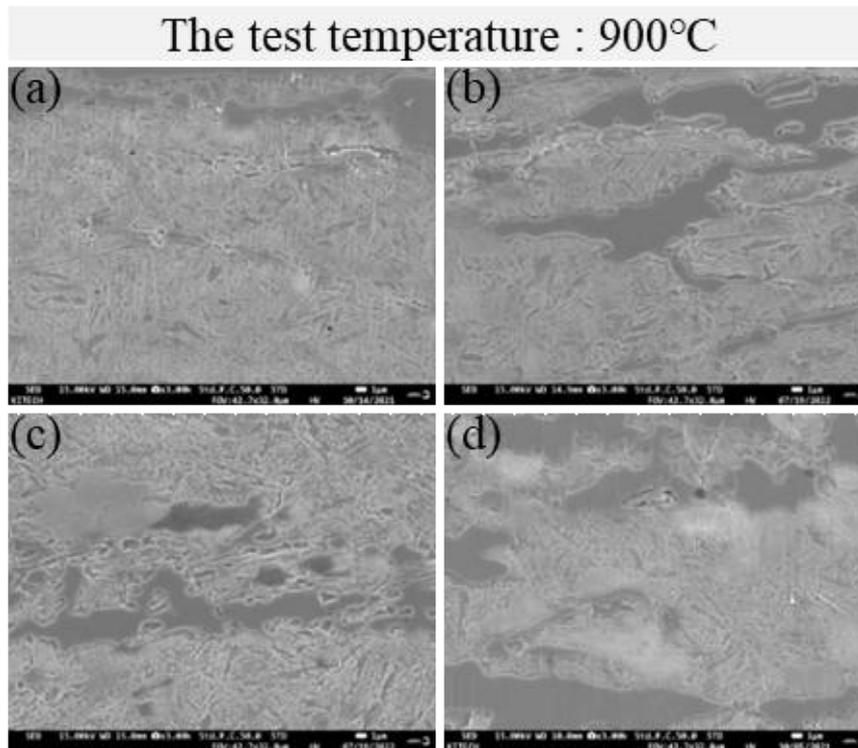


Fig. 35. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 900℃ with the heating temperature of 1200℃; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>.

4-7. 압축시험온도 800℃ 조건 : 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 36에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 800℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰 결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 압축시험온도 100℃와 900℃ 조건과 마찬가지로 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 심한 크랙이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부 (d-2)에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 또한, 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터는  $0.01s^{-1}$ 와  $0.001s^{-1}$  조건 대비 큰 크랙이 관찰되며 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가할수록 심하게 관찰된다.

제3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 압축시험온도 800℃ 조건은 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 결함이 관찰되지 않으나, 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서는 모든 변형률 속도 조건에서 단면 외곽 인접부에서는 크랙이 관찰된다.

압축시험온도가 900℃에서 800℃로 낮아지면 압축시험온도 900℃ 조건에서는 변형률 속도와 관계없이 미세조직은 건전한 반면, 압축시험온도 800℃ 조건에서는 모든 변형률 속도에서 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다.

압축시험온도 800℃ 조건은 압축시험온도 1100℃ 조건과 비교 시 결함의 양상이 다른 크랙이 관찰되는 이유는 압축시험온도 조건 중 가장 낮은 온도 조건으로 제3절 제2항에서 고온압축 시, 800℃의 유동응력 값은 1100℃, 1000℃ 및 900℃의 유동응력 값보다 높아 외부로부터 가장 큰 힘이 작용한다. 또한, 낮은 시험온도로 인해 입계 시멘타이트와 기지 사이의 강도 차이가 커 고온변형 동안 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 발생한 것으로 판단된다.[40]

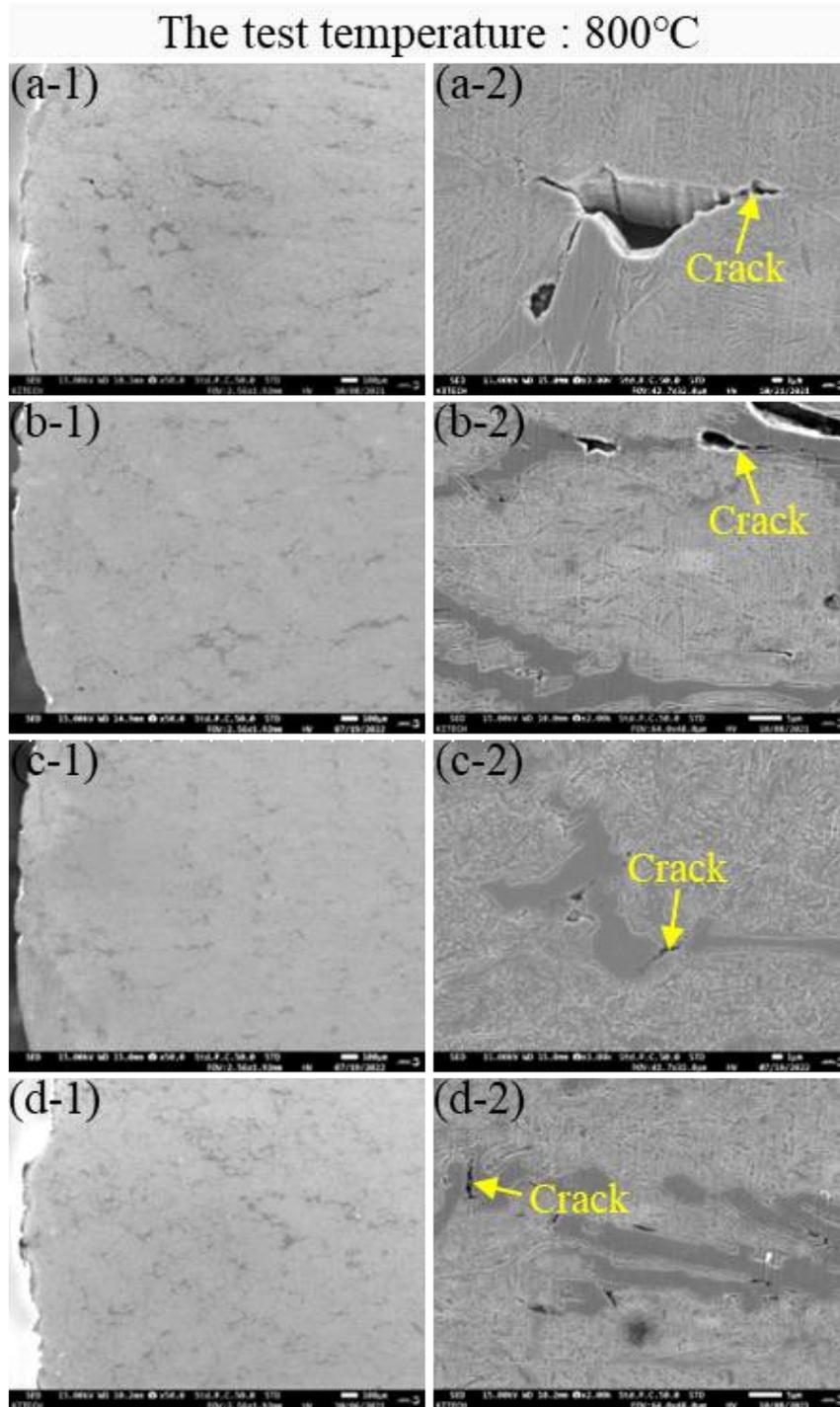


Fig. 36. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 800°C with the heating temperature of 1200°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side.

4-8. 압축시험온도 800℃ 조건 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 37에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 800℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건 (a)에서는 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건과 다르게 단면 중심부에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  조건 (b)에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 중심부에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 변형률 속도  $0.01s^{-1}$  (c)와  $0.001s^{-1}$  조건 (d)에서는  $1.0s^{-1}$ 와  $0.1s^{-1}$  조건과 다르게 단면 중심부의 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터는  $0.01s^{-1}$ 와  $0.001s^{-1}$  조건과 달리 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다.

압축시험온도가 900℃에서 800℃로 낮아지면 압축시험온도 900℃ 조건에서는 변형률 속도와 관계없이 미세조직은 건전한 반면, 압축시험온도 800℃ 조건에서는  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터 단면 중심부의 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다.

압축시험온도 800℃ 조건에서 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 발생한 크랙은 단면 외곽 인접부에서 변형률 속도와 관계없이 관찰되는 반면, 단면 중심부에선 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터 관찰된다. 또한, 단면 외곽 인접부에서 관찰되는 크랙은 단면 중심부에서 관찰되는 크랙 대비 크게 관찰된다. 압축시험온도 1100℃ 조건에서도 단면 외곽 인접부에서 관찰되는 국부 용융은 단면 중심부에서 관찰되는 국부 용융 대비 크고 심하게 관찰된다.

이는 아다마이트 주강을 고온압축하는 과정에서 압축방향과 수평인 방향의 압축 응력이 시험편에 작용되는데 시험편 외곽부의 경우, 압축방향과 수직인 방향의 인장응력이 작용되기 때문에 단면 중심부 대비 단면 외곽부에서 결함의 정도는 심하게 관찰된다.[41]

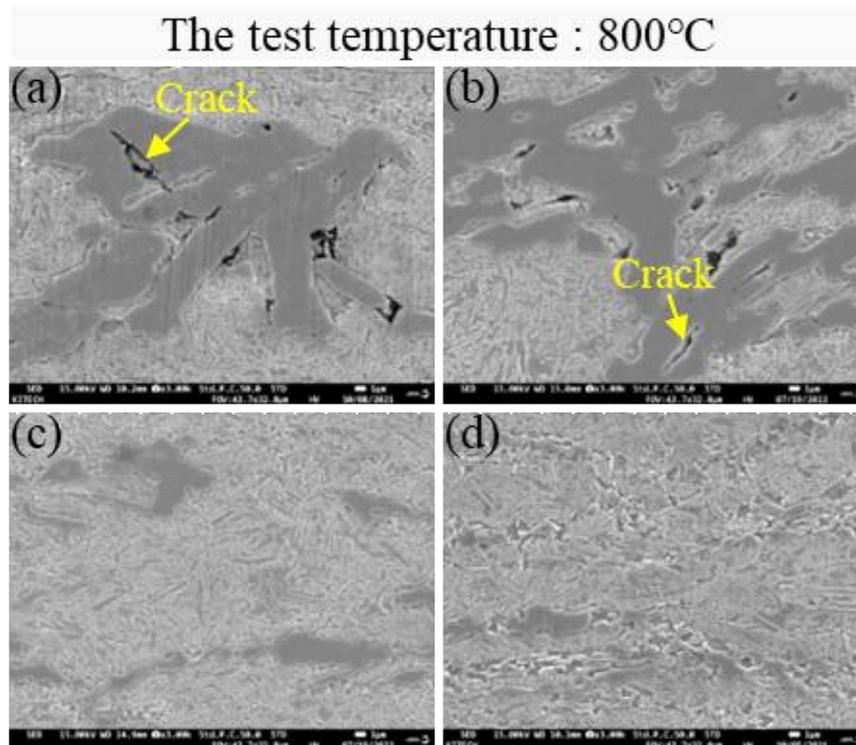


Fig. 37. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 800°C with the heating temperature of 1200°C; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ , (c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ .

## 5. Instability map과 미세조직의 상관관계

Fig. 38에서는 제3절 제3항에서 작성한 아다마이트 소재의 Instability map과 제3절 제4항의 미세조직 관찰결과를 함께 나타내었다. 압축시험온도 1100℃ 조건의 Ziegler parameter 값은 변형률 속도와 관계없이 전부 음의 값을 갖으며, 변형률 속도가 증가할수록 낮아진다. 압축시험온도 1100℃ 조건의 미세조직 관찰결과에서는 변형률 속도와 관계없이 단면 외곽부에서 표면 터짐과 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰되는데 변형률 속도가 증가할수록 심하게 관찰되며, Ziegler parameter 계산 결과 값과 일치한다.

압축시험온도 800℃ 조건도 Ziegler parameter 값은 변형률 속도와 관계없이 전부 음의 값을 갖으며, 변형률 속도가 증가할수록 낮아진다. 압축시험온도 800℃ 조건의 미세조직 관찰결과에서는 변형률 속도와 관계없이 단면 외곽 인접부에서 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위 입내에서 크랙이 관찰되는데 변형률 속도가 증가할수록 심하게 관찰되며, Ziegler parameter 계산 결과 값과 일치한다.

압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건의 Ziegler parameter 값은 압축시험온도 1100℃와 800℃ 조건과는 다르게 모든 변형률 속도에서 전부 양의 값을 갖는다. 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건의 미세조직 관찰결과에서는 모든 변형률 속도에서 미세조직은 건전하며, Ziegler parameter 계산 값과 일치한다.

Ziegler parameter 값을 계산하여 작성한 아다마이트 소재의 Instability map을 통해 구분한 소성 불안정 영역에서는 표면 터짐, 국부 용융 및 크랙 등이 관찰되는 반면, 소성 안정 영역에서는 결함이 관찰되지 않는다. 이에 따라 Instability map과 실제 고온압축시험편의 미세조직 관찰결과는 서로 잘 부합하며 신뢰성이 확인된다.

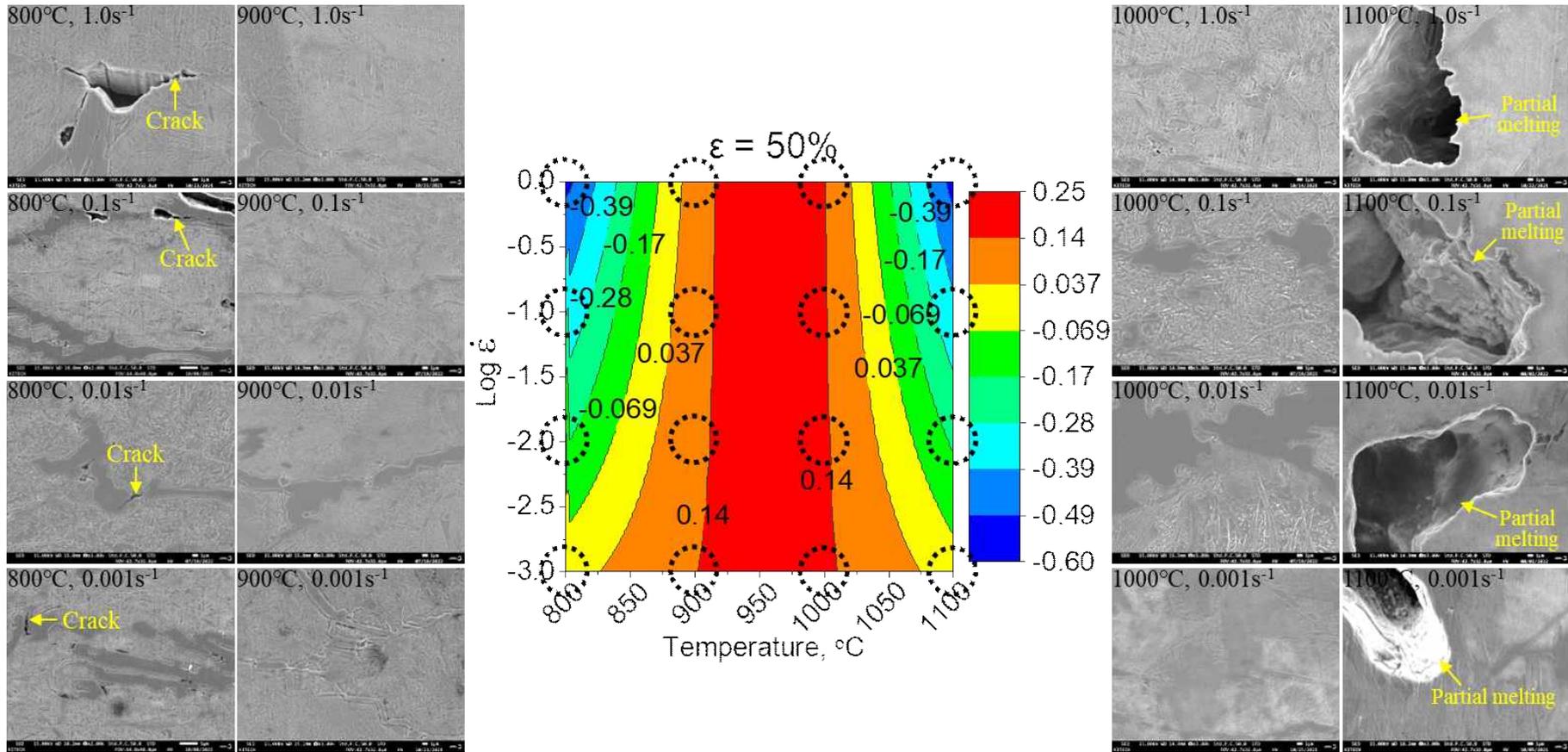


Fig. 38. Reliability between microstructures and instability map obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1200°C.

## 제 4 절. 고찰

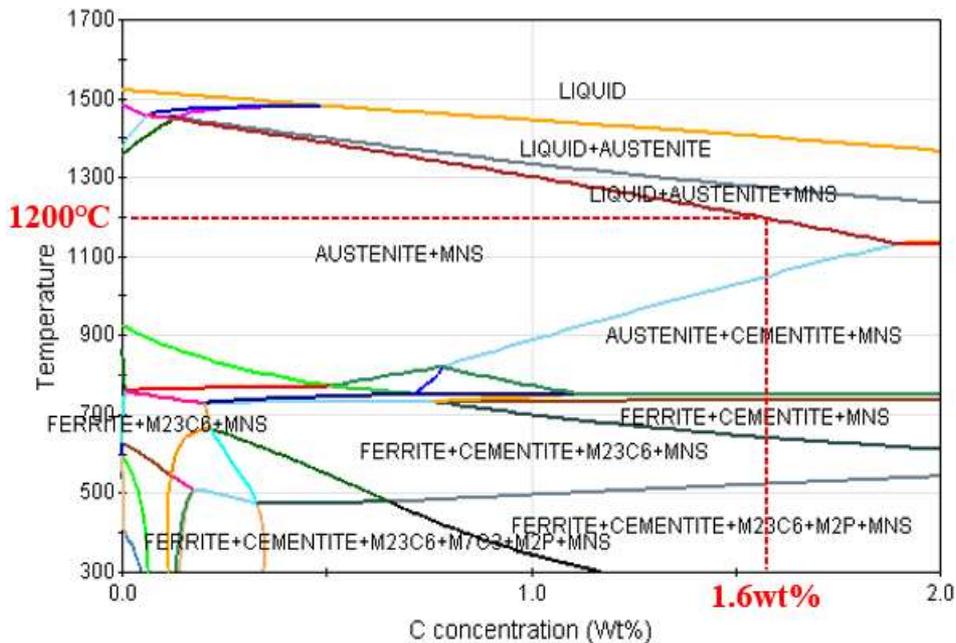


Fig. 39. A Phase diagram of adamite calculated using JMatPro.

### · 국부 용융의 원인

아다마이트 주강을 초기에 1200°C까지 가열하고 1100°C에서 압축한 시험편에서는 변형률 속도와 관계없이 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되며, 미세조직 관찰결과에서는 변형률 속도가 증가할수록 심한 표면 터짐과 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 함께 관찰되었다. 표면이 터지는 현상은 입계 시멘타이트에서 관찰된 국부 용융과 같은 원인에 의해 발생 가능하기 때문에 국부 용융이 발생하는 원인에 대해 고찰하였다.

Fig. 39에서는 열역학 기반의 물성계산 프로그램인 JMatPro를 활용하여 아다마이트 소재의 평형 상태도를 나타내었다. 본 연구에서 사용된 아다마이트 주강은 탄소 함량이 1.6wt%로 고온압축시험 조건인 1200°C 가열온도는 고상온도의 경계에 가까이 위치한다. 실제로 아다마이트 주강에서 국부적으로 용융이 발생하기 시작하는 온도를 확인하기 위해 아다마이트 주강을 다양한 온도에 따른 열처리 후 미세조직을 Fig. 40에 나타내었다.

열처리 조건은 각 온도까지 0.05°C/sec의 매우 느린 승온 속도로 가열하고 5분 유지 후 공냉 처리하였다. 가장 낮은 온도인 1100°C 조건 (a)에서는 입계 시멘타이트

에서 국부 용융이 관찰되지 않는다. 하지만, 3°C 높은 온도인 1103°C 조건 (b)에서 부터는 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰되기 시작한다. 또한, 국부 용융의 크기와 정도는 온도가 1103~1200°C까지 증가할수록 심하게 관찰된다.

실제로 아다마이트 주강에서 국부적으로 용융이 발생하기 시작하는 온도는 1103°C로 확인되며, 국부 용융이 발생하지 않는 온도 조건은 1100°C이다. 따라서, 아다마이트 주강을 고온 변형 시 가열온도는 1200°C보다 낮은 온도인 1100°C 조건이 적합한 것으로 판단된다.

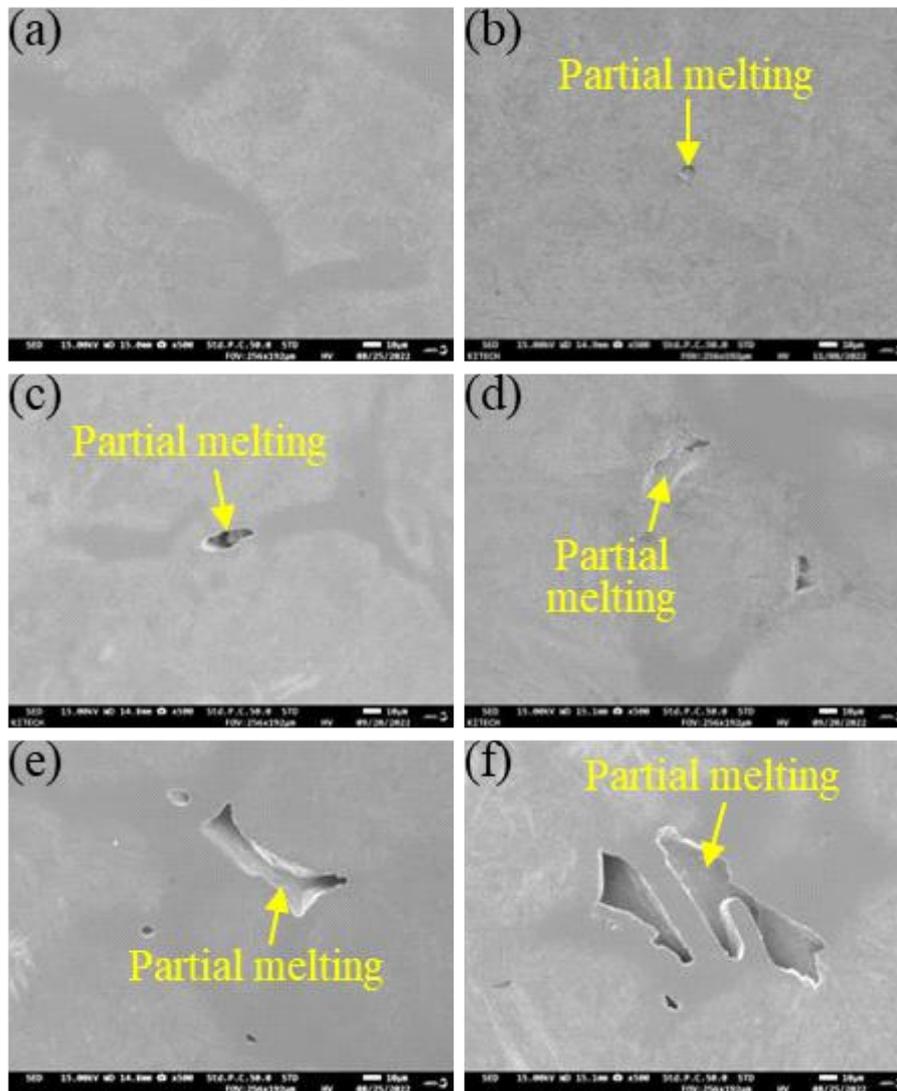


Fig. 40. SEM images of adamite cast steel according to the temperatures; (a) 1200°C, (b) 1150°C, (c) 1130°C, (d) 1110°C, (e) 1103°C and (f) 1100°C.

## 제 5 절. 결론

가열온도 1200℃에서 아다마이트 주강에 소성 변형 적용이 가능하면서도 안정한 열간 성형 조건을 도출하기 위해 고온압축시험을 통해 고온 가공성을 평가하였다. 가열온도 1200℃, 변형률 50% 조건에서 작성된 아다마이트 주강의 *Instability map*에 의하면 변형률 속도와 관계없이 성형온도 1020~880℃는 안정한 성형 조건으로 도출되었다. 불안정한 성형 조건 중 성형온도 1100℃에서는 심한 표면 터짐, 크랙 및 입계 시멘타이트에서 다수의 국부 용융이 관찰되었으며, 성형온도 800℃에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰되었다. 아다마이트 주강의 가열온도는 1103℃ 이상인 온도 조건에서부터 국부 용융이 관찰되기 때문에 고온 변형 시 국부적으로 용융이 발생하지 않는 1100℃에서 가열할 것으로 사료된다.

## 제 4 장. 1100℃ 가열온도에 의한 아다마이트 주강의 고온변형거동

### 제 1 절. 서론

아다마이트 주강을 1200℃까지 가열하고 1100℃ 조건에서 변형하면 입계 시멘타이트에서 국부적으로 용융이 발생하여 표면에서 터짐이 관찰된다. 아다마이트 상태에서 1200℃는 고상온도의 경계에 가까이 위치하며, 실제로 아다마이트 주강에서 국부적으로 용융이 관찰되기 시작하는 온도는 1103℃이다.

본 챕터에서는 아다마이트 주강의 고온변형 시 발생하는 심한 표면 터짐, 크랙 및 국부 용융을 개선하기 위해 기존 가열온도 1200℃를 1100℃로 낮추어 안정한 열간 성형 조건을 도출하고자 한다. 아다마이트 주강을 초기에 1100℃까지 가열 후, 다양한 압축시험온도와 변형률 속도에 따라 고온압축시험을 통해 고온 가공성을 평가하였다.

### 제 2 절. 실험방법

Fig. 41에서는 기존 가열온도인 1200℃를 1100℃로 낮춘 고온압축시험의 열처리 사이클에 대한 모식도를 나타내었다. 가열온도를 1200℃에서 1100℃로 낮춰 4℃/sec 승온 속도로 1100℃까지 가열 후, 5분동안 유지하고 압축시험온도 1100℃, 1000℃, 900℃ 및 800℃까지 냉각 속도 30℃/sec로 각각 급속 냉각하여 모든 압축시험온도 조건에서 변형률은 50%로 동일하게 압축하였다. 이때 모든 압축시험온도 조건에서 변형률 속도는 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup>, 0.001s<sup>-1</sup>의 네 가지 조건으로 각각 달리하여 실시하였으며 압축 완료 후 장비 내에서 공냉 처리하였다.

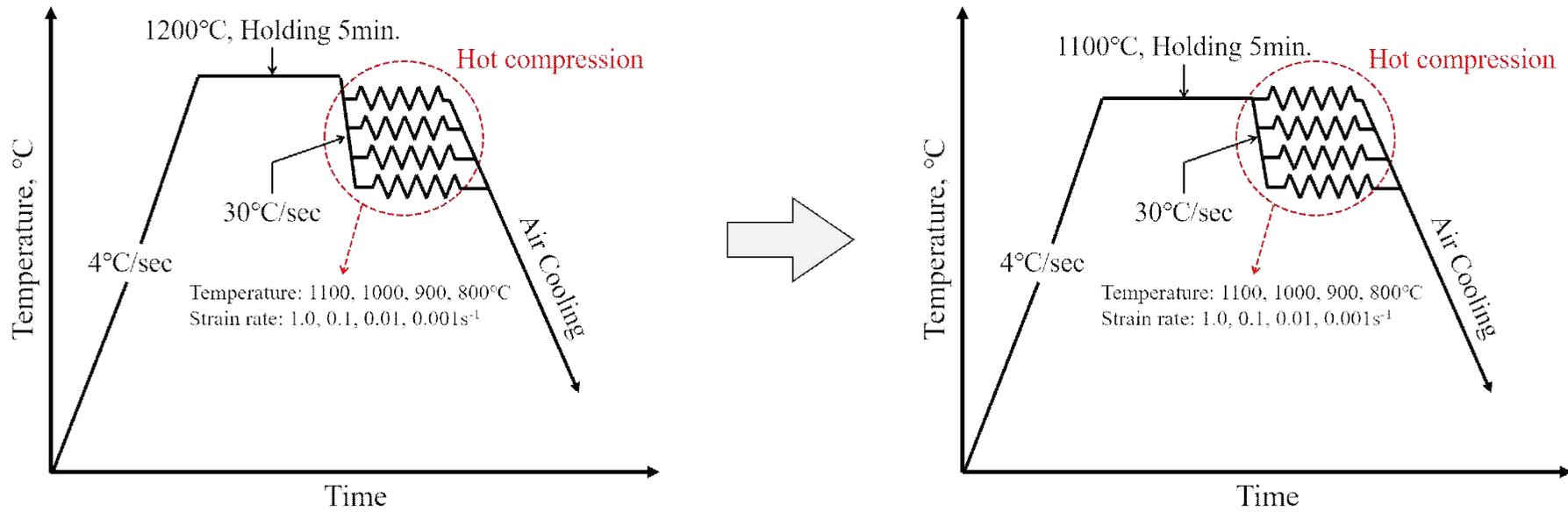


Fig. 41. A schematic diagram of the hot compression test with the heating temperature of 1100°C.

### 제 3 절. 결과

#### 1. 고온압축시험편 외부형상

아다마이트 주강의 고온압축시험 후 시험편의 외부형상을 통해 외관상 표면에서의 결함 발생 유무를 관찰하였다. 고온압축시험편의 압축 방향과 수평인 방향으로 절단 후, 모든 압축시험온도와 변형률 속도에 따른 각 시험편의 외부형상을 함께 비교하였다.

Fig. 42에서는 가열온도 1100℃에서 아다마이트 주강의 고온압축시험 후 외부형상 이미지를 나타내었다. 가장 높은 압축시험온도 1100℃ 조건에서는 변형률 속도  $1.0s^{-1}$  조건에서만 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되며 나머지 변형률 속도  $0.001s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$  조건에서는 시험편 외관상 표면 터짐이나 크랙은 관찰되지 않는다. 압축시험온도 1000℃ 조건에서는 모든 변형률 속도에서 시험편 외관상 표면 터짐이나 크랙이 관찰되지 않는다. 압축시험온도 900℃와 800℃ 조건의 경우, 압축시험온도 1000℃ 조건과 유사한 현상을 나타내고 있다.

제3장 제3절 제1항에서는 가열온도가 1200℃인 경우, 압축시험온도 1100℃ 조건에서는 변형률 속도와 관계없이 심한 표면 터짐과 크랙이 관찰되는데 가열온도를 1200℃에서 1100℃로 낮추면 가장 변형률 속도  $1.0s^{-1}$  조건을 제외한 나머지 시험편에서는 외관상 심한 표면 터짐과 크랙이 관찰되지 않는다. 압축시험온도 1000~800℃ 조건에서는 가열온도와 관계없이 시험편 외관상 결함이 관찰되지 않는다.

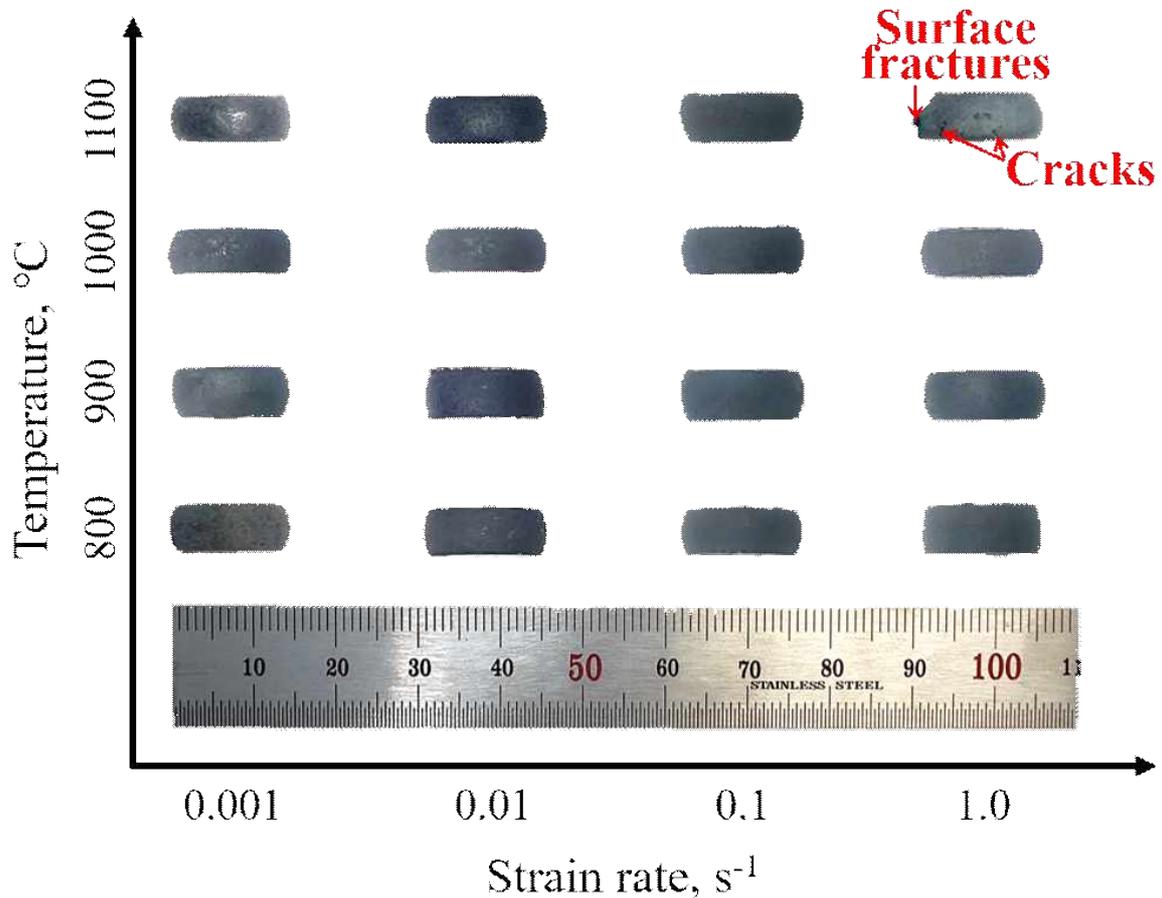


Fig. 42. Appearances of the hot compressed specimens with the heating temperature of 1100 °C.

## 2. 고온 유동응력-변형을 선도

Fig. 43에서는 아다마이트 주강의 변형을 50% ( $\Delta H/H_0$ ), 가열온도 1100 °C, 압축 시험온도 1100~800 °C의 구간과 변형률 속도 1.0~0.001 s<sup>-1</sup>의 범위에서 얻어진 고온 유동응력-변형을 선도를 나타내었다. 압축시험온도 1100 °C 조건 (a)에서 변형률 속도 1.0 s<sup>-1</sup>, 0.1 s<sup>-1</sup>, 0.01 s<sup>-1</sup> 및 0.001 s<sup>-1</sup>의 최대 유동응력 값은 75.76 Mpa, 62.17 Mpa, 41.74 Mpa 및 26.57 Mpa이다. 압축시험온도 1000 °C 조건 (b)에서 변형률 속도 1.0 s<sup>-1</sup>, 0.1 s<sup>-1</sup>, 0.01 s<sup>-1</sup> 및 0.001 s<sup>-1</sup>의 최대 유동응력 값은 139.03 Mpa, 100.59 Mpa, 69.17 Mpa 및 51.63 Mpa이다. 압축시험온도 900 °C 조건 (c)에서 변형률 속도 1.0 s<sup>-1</sup>, 0.1 s<sup>-1</sup>, 0.01 s<sup>-1</sup> 및 0.001 s<sup>-1</sup>의 최대 유동응력 값은 190.70 Mpa, 162.76 Mpa, 110.51 Mpa 및 90.20 Mpa이다. 압축시험온도 800 °C 조건 (d)에서 변형률 속도 1.0 s<sup>-1</sup>, 0.1 s<sup>-1</sup>, 0.01 s<sup>-1</sup> 및 0.001 s<sup>-1</sup>의 최대 유동응력 값은 290.24 Mpa, 252.52 Mpa, 202.08 Mpa 및 155.54 Mpa이다.

아다마이트 주강은 가열온도 1100℃에서 압축시험온도가 1100℃, 1000℃, 900℃ 및 800℃로 감소하고 변형률 속도가 0.001s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup> 및 1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 유동응력이 증가하는데 가열온도 1200℃ 조건과 동일한 경향을 보이고 있다. 또한, 일반적으로 초기에 압축하는 단계에서는 가공경화 (Work hardening)에 의해 응력이 증가하다가 압축이 진행됨에 따라 최대 응력에 도달한 후, 동적 재결정으로 인해 유동응력이 감소하거나 가공경화 현상과 동적 재결정의 연화 (Dynamic softening) 현상이 평형을 이뤄 일정하게 유지되는 정상상태를 나타낸다.[36-38] 아다마이트 소재의 경우, 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건에서는 최대 응력에 도달한 후, 변형률 속도와 관계없이 정상상태를 나타내는 반면, 압축시험온도 1100℃, 변형률 속도 0.1s<sup>-1</sup> 이상인 조건과 압축시험온도 800℃에서 모든 변형률 속도 조건에서는 최대 응력에 도달한 후, 유동응력이 감소한다.

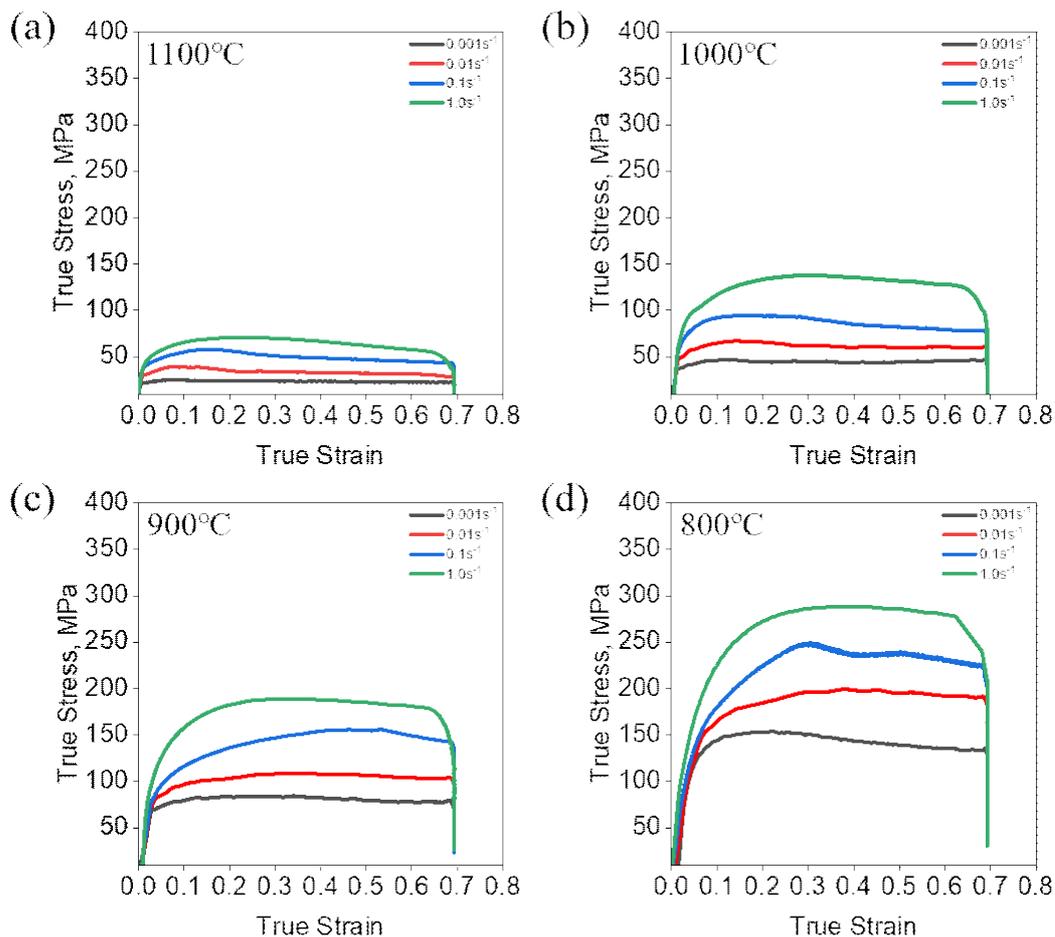


Fig. 43. Flow stress-strain curves obtained by the hot compression test with the heating temperature of 1100℃; The test temperature of (a) 1100℃, (b) 1000℃, (c) 900℃, and (d) 800℃.

### 3. Instability map

가열온도 1100℃, 변형률 50% 조건에서 모든 압축시험온도와 각 변형률 속도에 따른 아다마이트 주강의 Instability map을 작성하기 위해 앞서 제3절 제2항에서 압축시험을 통해 얻은 고온 유동응력-변형률 선도를 이용하여 동적재료모델을 기반으로 계산하였다.

#### 3-1. 유동응력

Table 10에서는 가열온도 1100℃, 변형률 50% 조건의 변형률 속도 민감도를 계산하기 위해 각 변형률 속도에 따른 유동응력 값을 작성하여 나타내었다. 압축시험온도가 1100℃, 1000℃, 900℃ 및 800℃로 감소하고 변형률 속도가 0.001s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup> 및 1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 유동응력 값은 증가하는 경향을 보인다.

Table 10. Flow stress values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100℃.

Temp. (°C)	Strain rate (s <sup>-1</sup> )	Flow stress (σ)
1100	1.0	39
	0.1	38
	0.01	29
	0.001	23
1000	1.0	91
	0.1	67
	0.01	57
	0.001	46
900	1.0	188
	0.1	149
	0.01	93
	0.001	73
800	1.0	210
	0.1	190
	0.01	189
	0.001	124

3-2. 변형률 속도 민감도

Fig. 44에서는 가열온도가 1200℃, 변형률이 50%인 조건에서 각 압축시험온도 1100℃, 1000℃, 900℃ 및 800℃와 변형률 속도 0.001s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup> 및 1.0s<sup>-1</sup>에 따른 유동응력 값에 자연로그를 취하고 기울기를 계산하기 위해 곡선을 그려 나타내었다.

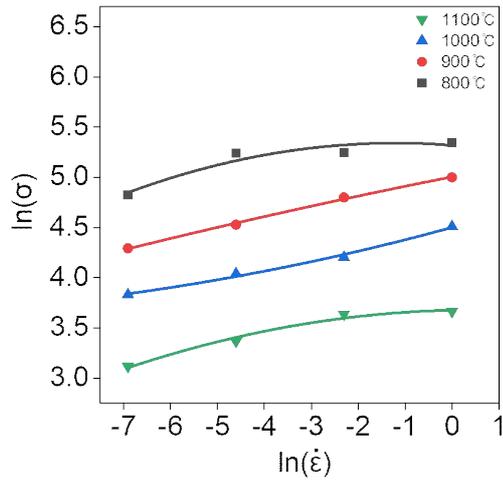


Fig. 44.  $\ln(\sigma)$  vs.  $\ln(\dot{\epsilon})$  plots of the hot compressed adamite obtained at the strain of 50% with the heating temperature of 1100℃.

Table 11. Strain rate sensitivity values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100℃.

Temp. (°C)	Strain rate (s <sup>-1</sup> )	Strain rate sensitivity (m)
1100	1.0	0.011
	0.1	0.059
	0.01	0.107
	0.001	0.108
1000	1.0	0.142
	0.1	0.143
	0.01	0.144
	0.001	0.145
900	1.0	0.084
	0.1	0.095
	0.01	0.126
	0.001	0.137
800	1.0	0.025
	0.1	0.059
	0.01	0.103
	0.001	0.104

Table 11에서는 가열온도 1100℃, 변형률 50% 조건에서 모든 압축시험온도와 각 변형률 속도에 따른 변형률 속도 민감도 값을 나타내었다. 변형률 속도 민감도는 제2장 제2절의 식 (3)을 통해 계산되었다. 모든 압축시험온도 1100℃, 1000℃, 900℃ 및 800℃ 조건에서는 변형률 속도가 0.001s<sup>-1</sup>에서 0.01s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup> 및 1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 변형률 속도 민감도 값은 감소한다.

### 3-3. Ziegler parameter

Table 12에서는 가열온도 1100℃, 변형률 50% 조건에서 모든 압축시험온도와 각 변형률 속도에 따른 Ziegler parameter 값을 나타내었다. Ziegler parameter는 제2장 제2절의 식 (6)을 통해 계산되었다. 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 Ziegler parameter 값은 -0.377, -0.231, -0.085 및 -0.001이다. 압축시험온도 1000℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 Ziegler parameter 값은 0.185, 0.186, 0.188 및 0.189이다. 압축시험온도 900℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 Ziegler parameter 값은 0.140, 0.141, 0.142 및 0.143이다. 압축시험온도 800℃ 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>의 Ziegler parameter 값은 -0.410, -0.235, -0.088 및 -0.005이다.

압축시험온도 1100℃와 800℃ 조건의 Ziegler parameter 값은 변형률 속도와 관계 없이 전부 음의 값을 가지며, 변형률 속도가 증가할수록 값이 낮아지는데 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건 대비 모든 변형률 속도 조건에서 상대적으로 낮게 계산된다.

가열온도 1100℃ 조건의 모든 압축시험온도 1100~800℃의 구간과 변형률 속도 1.0~0.001s<sup>-1</sup>의 범위의 Ziegler parameter는 가열온도 1200℃ 조건 대비 높게 계산된다.

Table 12. Ziegler parameter values obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100°C.

Temp. (°C)	Strain rate (s <sup>-1</sup> )	Ziegler parameter (ξ)
1100	1.0	-0.377
	0.1	-0.231
	0.01	-0.085
	0.001	-0.001
1000	1.0	0.185
	0.1	0.186
	0.01	0.188
	0.001	0.189
900	1.0	0.140
	0.1	0.141
	0.01	0.142
	0.001	0.143
800	1.0	-0.410
	0.1	-0.235
	0.01	-0.088
	0.001	-0.005

### 3-4. 아다마이트 소재의 Instability map

Fig. 45에서는 계산한 Ziegler parameter 값을 통해 가열온도 1100°C, 변형률 50% 조건에서 작성된 아다마이트 소재의 Instability map을 나타내었다. Instability map에서 Ziegler parameter 값이 양수인 영역은 변형률 속도와 관계없이 약 1040°C부터 870°C까지로 소성 안정 영역으로 구분된다. 나머지 압축시험온도 1100°C와 800°C 조건의 Ziegler parameter 값은 변형률 속도와 관계없이 전부 음수이며 소성 불안정 영역으로 구분된다. 소성 안정 영역과 불안정 영역에 대한 구분은 Ziegler parameter 값에 의해 나뉘는데 Ziegler parameter 값이 음수인 소성 불안정 영역을 제외하면 가열온도 1100°C, 변형률 50%에서 아다마이트 소재의 안정한 열간 성형 조건은 변형률 속도와 관계없이 약 1040~870°C로 도출되며, 제3장 제3절 제3항에서 가열온도 1200°C, 변형률 50%에서 아다마이트 소재의 안정한 열간 성형 조건의 경우, 변형률 속도와 관계없이 약 1040~870°C로 가열온도와 관계없이 유사하다.

Ziegler parameter 값이 음수인 소성 불안정 영역에서는 크랙, 전단밴드 등 비정상 조직의 발생 가능성이 높다.[] 아다마이트 소재의 Instability map과 실제 미세조직의 상관관계를 확인하기 위해 제4절에서는 아다마이트 고온압축시험편의 단면 미세조직을 관찰하였다.

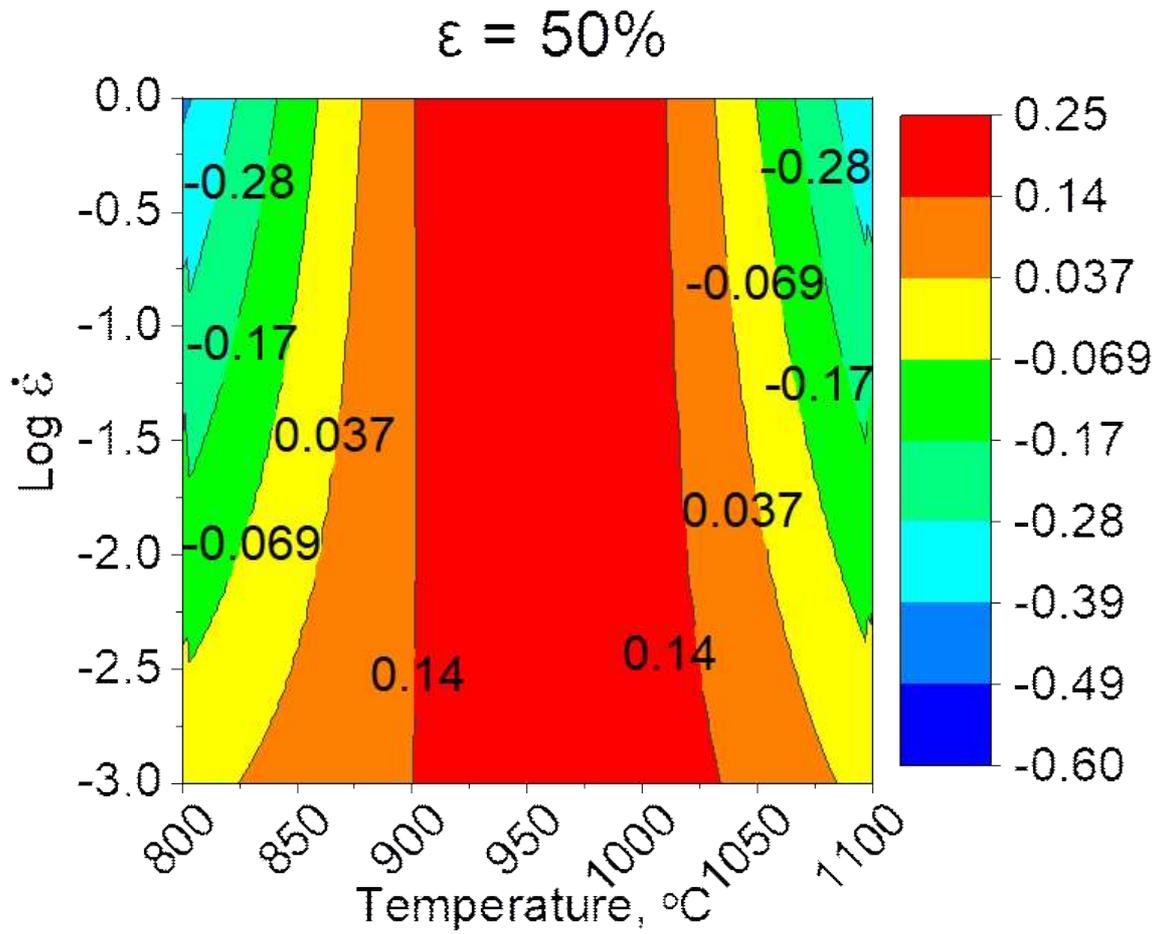


Fig. 45. An instability map obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100 $^{\circ}\text{C}$ .

## 4. 미세조직 관찰

아다마이트 고온압축시험편의 미세조직과 앞서 제3절 제3항에서 동적재료모델에 의해 작성한 Instability map의 관계를 확인하기 위해 FE-SEM을 활용하여 고온압축 시험편의 단면 외곽부 (The bulged side of the cross-section), 단면 외곽 인접부 (Around the bulged side of the cross-section) 및 단면 중심부 (The center of the cross-section)의 미세조직을 저배율과 고배율에서 각각 관찰하였다.

### 4-1. 압축시험온도 1100℃ 조건 : 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 46에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 단면 외곽부 (a-1)에서 심한 표면 터짐 (Fracture)이 관찰되는데 표면 터짐이 발생한 단면 외곽 인접부 (a-2)에서는 입계를 따라 형성된 시멘타이트에서 국부 용융 (Partial melting)이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 다르게 단면 외곽부에서 표면 터짐이 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서는 국부 용융이 관찰된다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부 (d-2)에서는 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 또한, 국부 용융은 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가할수록 심하게 관찰된다.

제3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 압축시험온도 1100℃ 조건은 변형률 속도  $1.0s^{-1}$  조건에서만 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되는 반면, 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서는 표면 터짐과 관계없이 모든 변형률 속도 조건에서 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다.

가열온도를 1200℃에서 1100℃로 낮춘 결과, 표면 터짐은 가장 빠른 변형률 속도  $1.0s^{-1}$  조건에서만 관찰되며, 변형률 속도와 관계없이 가열온도 1200℃ 대비 크기와 정도가 감소한 국부 용융이 관찰된다.

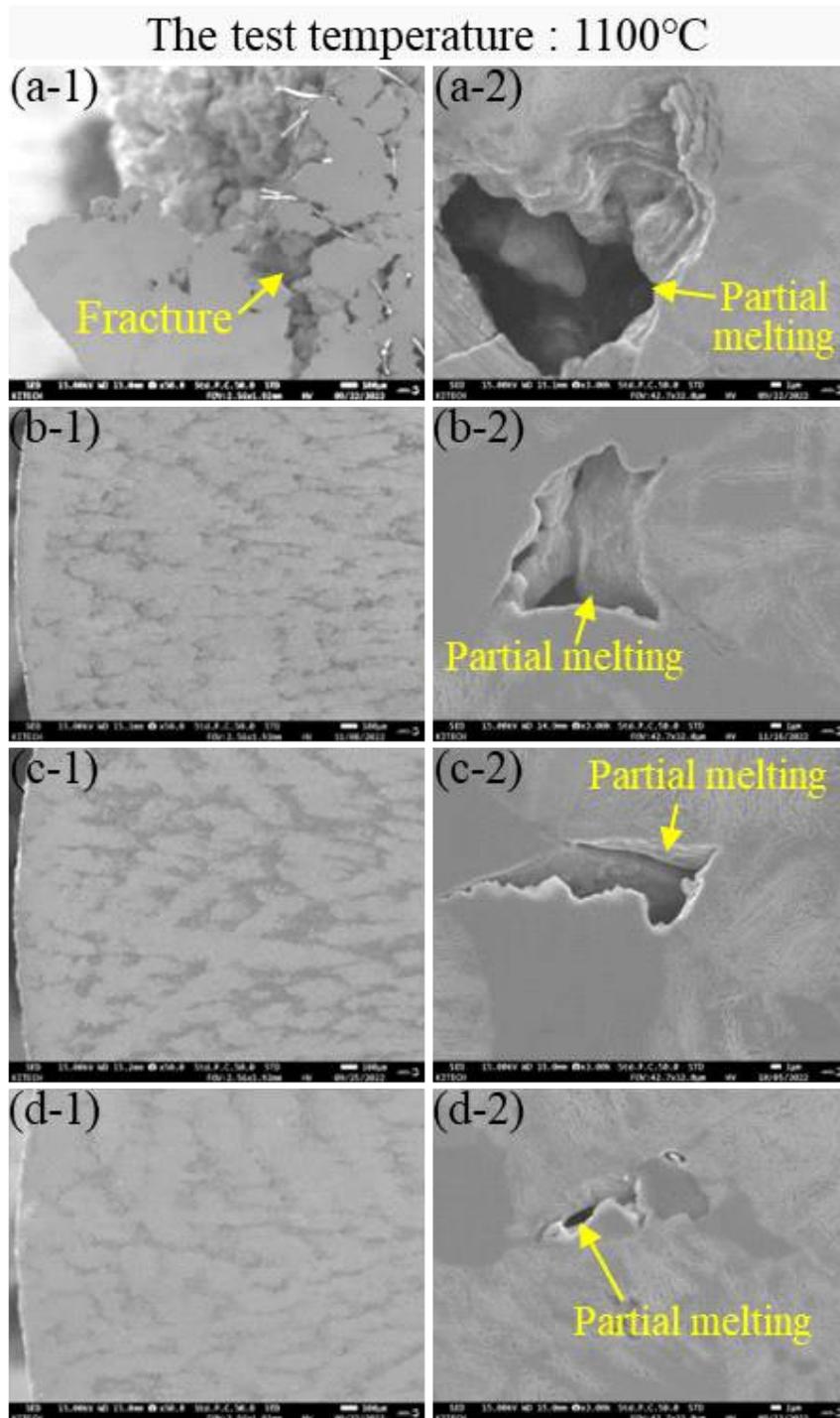


Fig. 46. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1100°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side.

4-2. 압축시험온도 1100°C 조건 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 47에서는 가열온도 1100°C, 압축시험온도 1100°C 조건에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>, 0.1s<sup>-1</sup>, 0.01s<sup>-1</sup> 및 0.001s<sup>-1</sup>에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인 1.0s<sup>-1</sup> 조건 (a)에서는 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 변형률 속도 0.1s<sup>-1</sup> 조건 (b)에서는 1.0s<sup>-1</sup> 조건과 유사하게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 변형률 속도 0.01s<sup>-1</sup> (c)와 0.001s<sup>-1</sup> 조건 (d)에서는 1.0s<sup>-1</sup>와 0.1s<sup>-1</sup> 조건과 다르게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰되지 않는다.

가열온도를 1200°C에서 1100°C로 낮춘 결과, 국부 용융은 변형률 속도 0.1s<sup>-1</sup> 이상인 조건에서부터 관찰되며, 가열온도 1200°C 대비 정도가 감소한 국부 용융이 관찰된다.

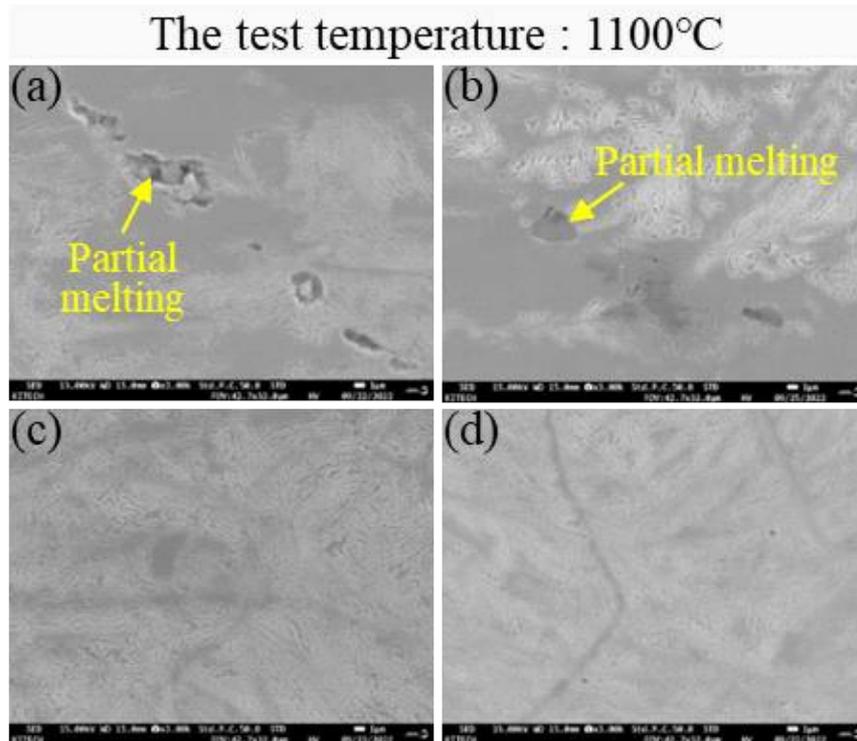


Fig. 47. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1100°C; The strain rate of (a) 1.0s<sup>-1</sup>, (b) 0.1s<sup>-1</sup>, (c) 0.01s<sup>-1</sup>, and (d) 0.001s<sup>-1</sup>.

4-3. 압축시험온도 1000℃ 조건 : 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 48에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1000℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 압축시험온도 1100℃ 조건과 다르게 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐이 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서도 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐이나 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐이나 단면 외곽 인접부 (d-2)의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다.

제3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 압축시험온도 1000℃ 조건은 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 결함이 관찰되지 않는데 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서도 모든 변형률 속도 조건에서 결함은 관찰되지 않는다.

압축시험온도가 1100℃에서 1000℃로 낮아지면 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도와 관계없이 단면 외곽 인접부에서 관찰된 국부 용융은 압축시험온도 1000℃ 조건에서는 모든 변형률 속도에서 관찰되지 않으며 미세조직은 건전하다.

가열온도를 1200℃에서 1100℃로 낮추더라도 압축시험온도 1000℃ 조건에서는 모든 변형률 속도 조건에서 건전한 미세조직이 동일하게 확인된다.

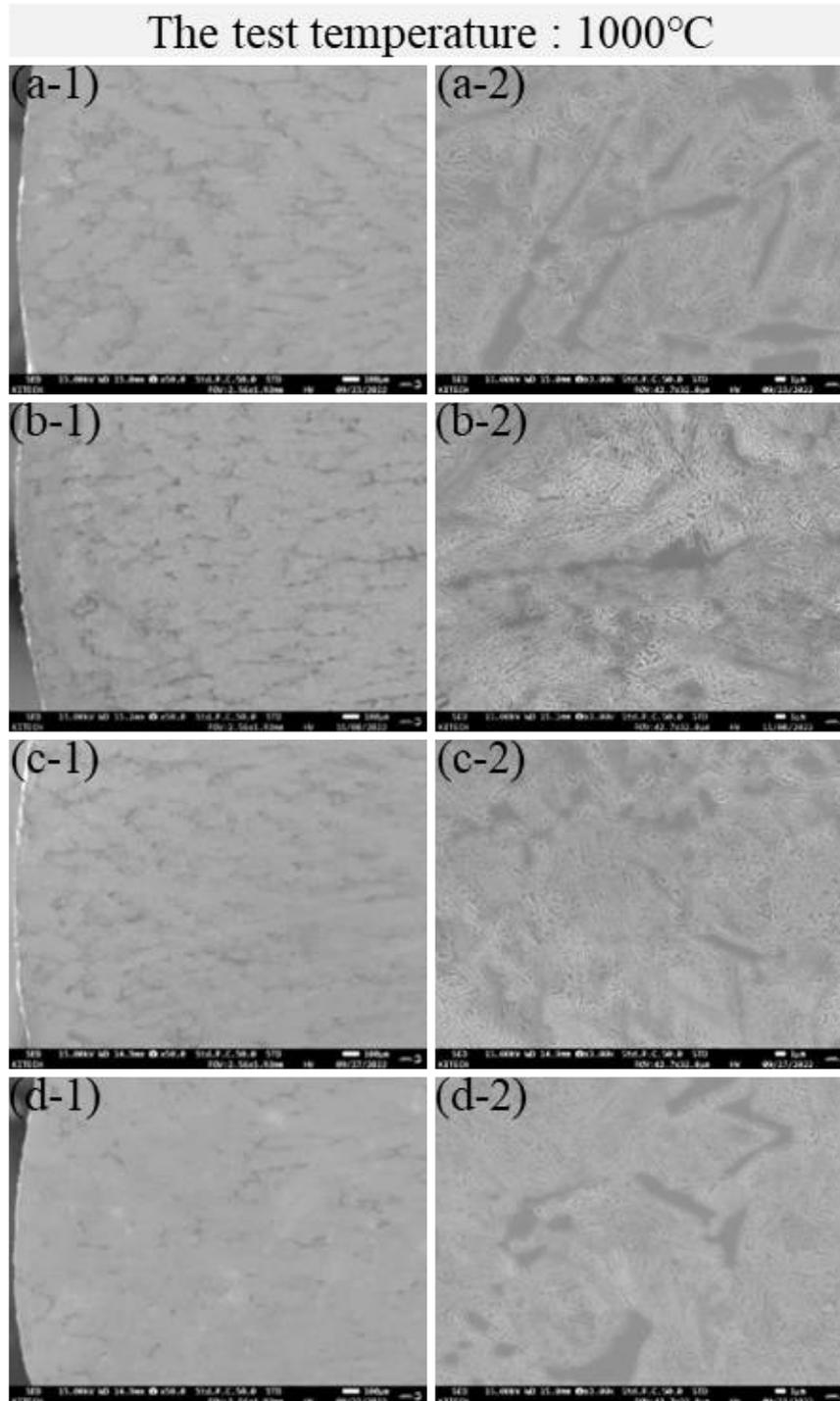


Fig. 48. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1000°C with the heating temperature of 1100°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side.

4-4. 압축시험온도 1000℃ 조건 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 49에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1000℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건 (a)에서는 압축시험온도 1100℃ 조건과 다르게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  (b)와  $0.01s^{-1}$  조건 (c)에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건 (d)에서도 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다.

압축시험온도가 1100℃에서 1000℃로 낮아지면 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터 관찰된 국부 용융이 압축시험온도 1000℃ 조건에서는 모든 변형률 속도에서 관찰되지 않으며 미세조직은 건전하다.

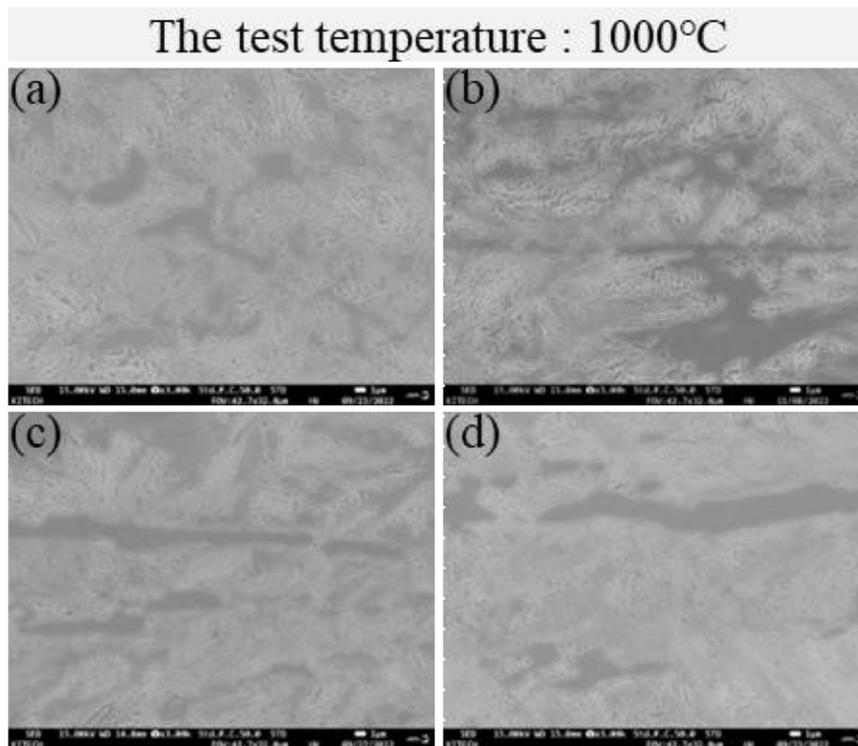


Fig. 49. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1000℃ with the heating temperature of 1100℃; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ , (c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ .

4-5. 압축시험온도 900℃ 조건 : 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 50에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 900℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰 결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 마찬가지로 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐이 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서도 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐이나 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐이나 단면 외곽 인접부 (d-2)의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다.

제3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 압축시험온도 900℃ 조건은 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 결함이 관찰되지 않는데 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서도 모든 변형률 속도 조건에서 결함은 관찰되지 않는다.

압축시험온도가 1000℃에서 900℃로 낮아지더라도 압축시험온도 900℃ 조건에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 유사하게 모든 변형률 속도에서 미세조직은 건전하다. 또한, 압축시험온도 900℃ 조건은 가열온도와 관계없이 압축시험온도 1000℃ 조건과 마찬가지로 미세조직은 건전하다.

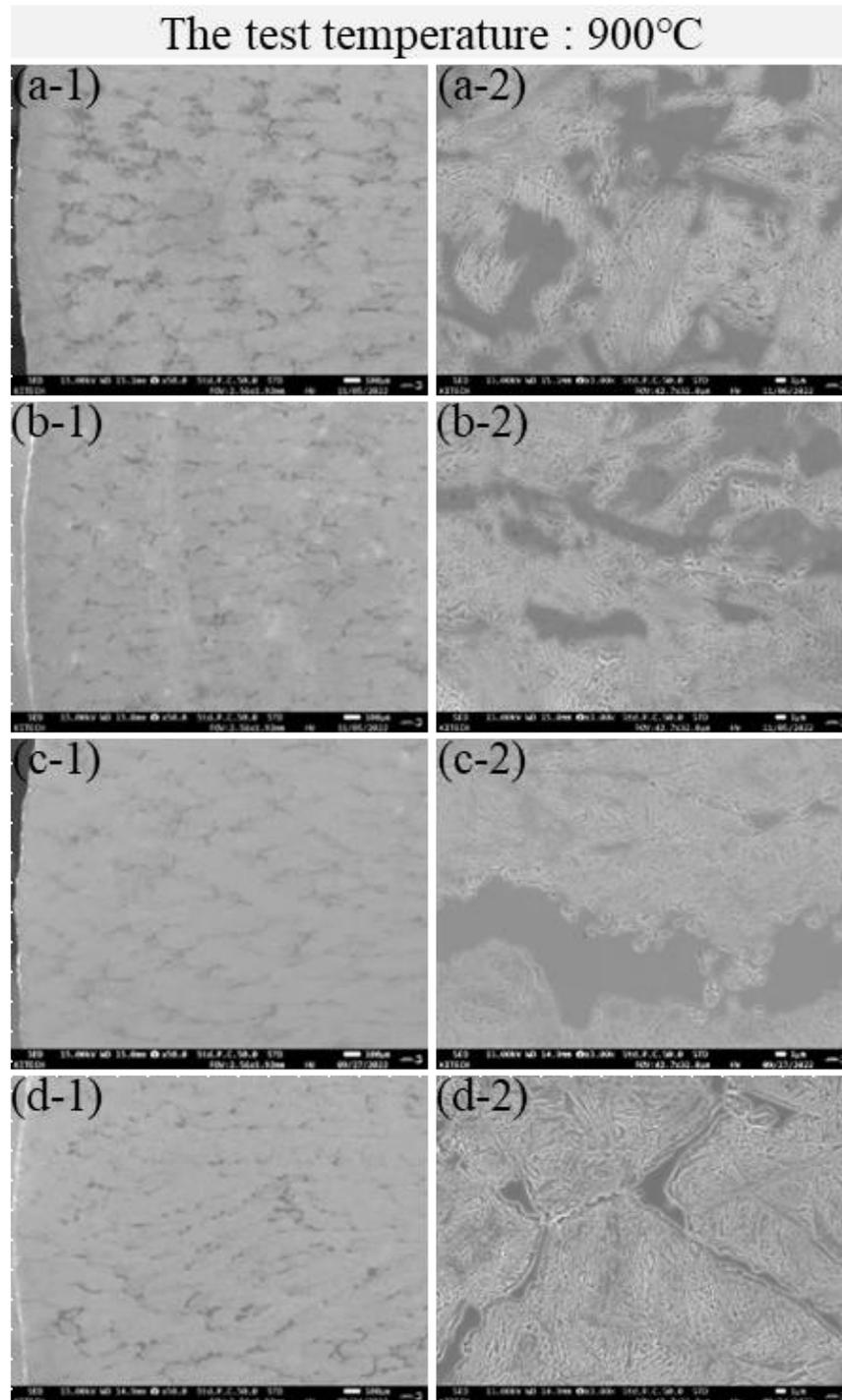


Fig. 50. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 900°C with the heating temperature of 1100°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side.

4-6. 압축시험온도 900℃ 조건 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 51에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 900℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건 (a)에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 마찬가지로 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  (b)와  $0.01s^{-1}$  조건 (c)에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건 (d)에서도 단면 중심부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않는다.

압축시험온도가 1000℃에서 900℃로 낮아지더라도 압축시험온도 900℃ 조건에서는 압축시험온도 1000℃ 조건과 유사하게 모든 변형률 속도에서 미세조직은 건전하다.

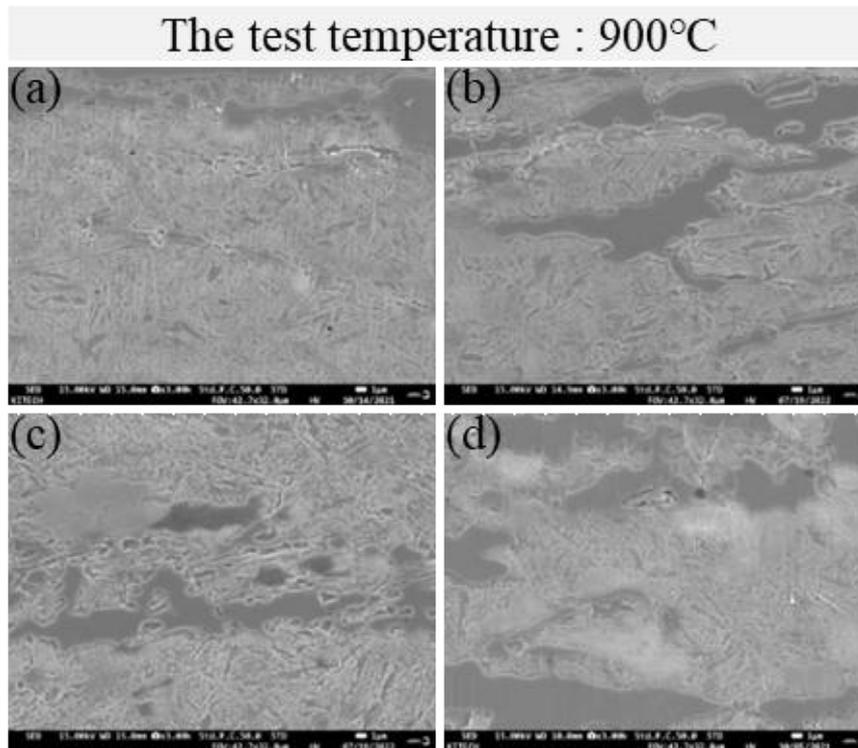


Fig. 51. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 900℃ with the heating temperature of 1100℃; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ , (c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ .

4-7. 압축시험온도 800℃ 조건 : 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 52에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 800℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰 결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건과 마찬가지로 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부 (d-2)에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 또한, 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터는  $0.01s^{-1}$ 와  $0.001s^{-1}$  조건 대비 큰 크랙이 관찰되며 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가할수록 심하게 관찰된다.

제3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 압축시험온도 800℃ 조건은 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 결함이 관찰되지 않으나, 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서는 모든 변형률 속도 조건에서 단면 외곽 인접부에서는 크랙이 관찰된다.

압축시험온도가 900℃에서 800℃로 낮아지면 압축시험온도 900℃ 조건에서는 변형률 속도와 관계없이 미세조직은 건전한 반면, 압축시험온도 800℃ 조건에서는 모든 변형률 속도에서 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다.

제3장 제3절 제4항에서 언급한 바와 같이 압축시험온도 800℃ 조건은 압축시험온도 1100℃ 조건과 비교 시 결함의 양상이 다른 크랙이 관찰되는 이유는 압축시험온도 조건 중 가장 낮은 온도 조건으로 제3절 제2항에서 고온압축 시, 800℃의 유동응력 값은 1100℃, 1000℃ 및 900℃의 유동응력 값보다 높아 외부로부터 가장 큰 힘이 작용한다. 또한, 낮은 시험온도로 인해 입계 시멘타이트와 기지 사이의 강도 차이가 커 고온변형 동안 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 발생한 것으로 판단된다.[39]

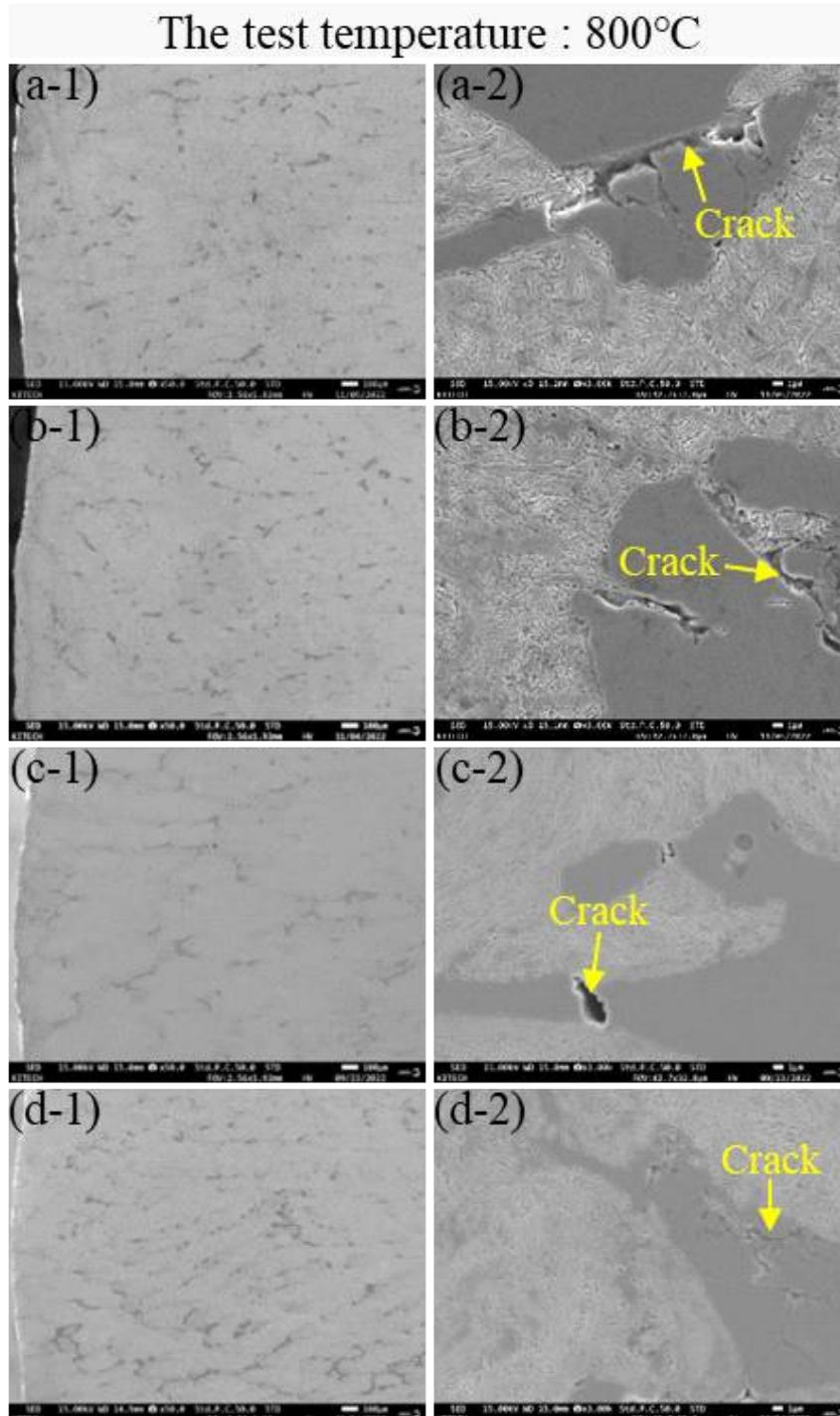


Fig. 52. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 800°C with the heating temperature of 1100°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side.

4-8. 압축시험온도 800℃ 조건 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 53에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 800℃ 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건 (a)에서는 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건과 다르게 단면 중심부에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  조건 (b)에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 중심부에서는 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다. 변형률 속도  $0.01s^{-1}$  (c)와  $0.001s^{-1}$  조건 (d)에서는  $1.0s^{-1}$ 와  $0.1s^{-1}$  조건과 다르게 단면 중심부의 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터는  $0.01s^{-1}$ 와  $0.001s^{-1}$  조건과 달리 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다.

압축시험온도가 900℃에서 800℃로 낮아지면 압축시험온도 900℃ 조건에서는 변형률 속도와 관계없이 미세조직은 건전한 반면, 압축시험온도 800℃ 조건에서는  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터 단면 중심부의 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 크랙이 관찰된다.

압축시험온도 800℃ 조건에서 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위의 입내에서 발생한 크랙은 단면 외곽 인접부에서 변형률 속도와 관계없이 관찰되는 반면, 단면 중심부에선 변형률 속도  $0.1s^{-1}$  이상인 조건에서부터 관찰된다. 또한, 단면 외곽 인접부에서 관찰되는 크랙은 단면 중심부에서 관찰되는 크랙 대비 크게 관찰된다. 압축시험온도 1100℃ 조건에서도 단면 외곽 인접부에서 관찰되는 국부 용융은 단면 중심부에서 관찰되는 국부 용융 대비 크고 심하게 관찰된다.

제3장 제3절 제4항에서 언급한 바와 같이 이는 아다마이트 주강을 고온압축하는 과정에서 압축방향과 수평인 방향의 압축응력이 시험편에 작용되는데 시험편 외곽부의 경우, 압축방향과 수직인 방향의 인장응력이 작용되기 때문에 단면 중심부 대비 단면 외곽부에서 결함의 정도는 심하게 관찰된다.[40]

가열온도를 1200℃에서 1100℃로 낮추더라도 압축시험온도 800℃ 조건에서는 동일한 변형률 속도 조건의 단면 외곽 인접부와 단면 중심부에서 크랙이 관찰되는데 가열온도 1200℃ 대비 크기와 정도는 감소한다.

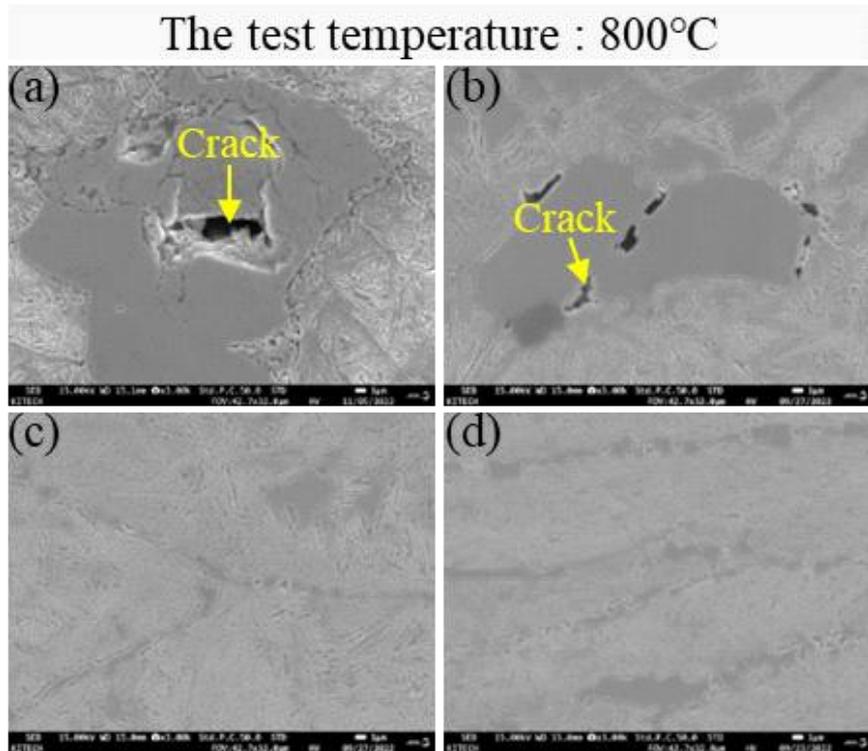


Fig. 53. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 800°C with the heating temperature of 1100°C; The strain rate of (a)  $1.0\text{s}^{-1}$ , (b)  $0.1\text{s}^{-1}$ , (c)  $0.01\text{s}^{-1}$ , and (d)  $0.001\text{s}^{-1}$ .

## 5. Instability map과 미세조직의 상관관계

Fig. 54에서는 제3절 제3항에서 작성한 아다마이트 소재의 Instability map과 제3절 제4항의 미세조직 관찰결과를 함께 나타내었다. 압축시험온도 1100℃ 조건의 Ziegler parameter 값은 변형률 속도와 관계없이 전부 음의 값을 갖으며, 변형률 속도가 증가할수록 낮아진다. 압축시험온도 1100℃ 조건의 미세조직 관찰결과에서는 변형률 속도와 관계없이 단면 외곽부에서 표면 터짐과 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰되는데 변형률 속도가 증가할수록 심하게 관찰되며, Ziegler parameter 계산 결과 값과 일치한다.

압축시험온도 800℃ 조건도 Ziegler parameter 값은 변형률 속도와 관계없이 전부 음의 값을 갖으며, 변형률 속도가 증가할수록 낮아진다. 압축시험온도 800℃ 조건의 미세조직 관찰결과에서는 변형률 속도와 관계없이 단면 외곽 인접부에서 입계 시멘타이트와 시멘타이트 주위 입내에서 크랙이 관찰되는데 변형률 속도가 증가할수록 심하게 관찰되며, Ziegler parameter 계산 결과 값과 일치한다.

압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건의 Ziegler parameter 값은 압축시험온도 1100℃와 800℃ 조건과는 다르게 모든 변형률 속도에서 전부 양의 값을 갖는다. 압축시험온도 1000℃와 900℃ 조건의 미세조직 관찰결과에서는 모든 변형률 속도에서 미세조직은 건전하며, Ziegler parameter 계산 값과 일치한다.

Ziegler parameter 값을 계산하여 작성한 아다마이트 소재의 Instability map을 통해 구분한 소성 불안정 영역에서는 표면 터짐, 국부 용융 및 크랙 등이 관찰되는 반면, 소성 안정 영역에서는 결함이 관찰되지 않는다. 이에 따라 Instability map과 실제 고온압축시험편의 미세조직 관찰결과는 서로 잘 부합하며 신뢰성이 확인된다.

가열온도를 1200℃에서 1100℃로 낮추면 모든 압축시험온도와 변형률 속도 조건에서 가열온도 1200℃ 대비 가열온도 1100℃ 조건의 Ziegler parameter 값이 더 높게 계산되는데 미세조직 관찰결과에서도 가열온도 1200℃ 대비 압축시험온도 1100℃와 800℃ 조건에서는 결함의 크기와 정도가 감소한다.

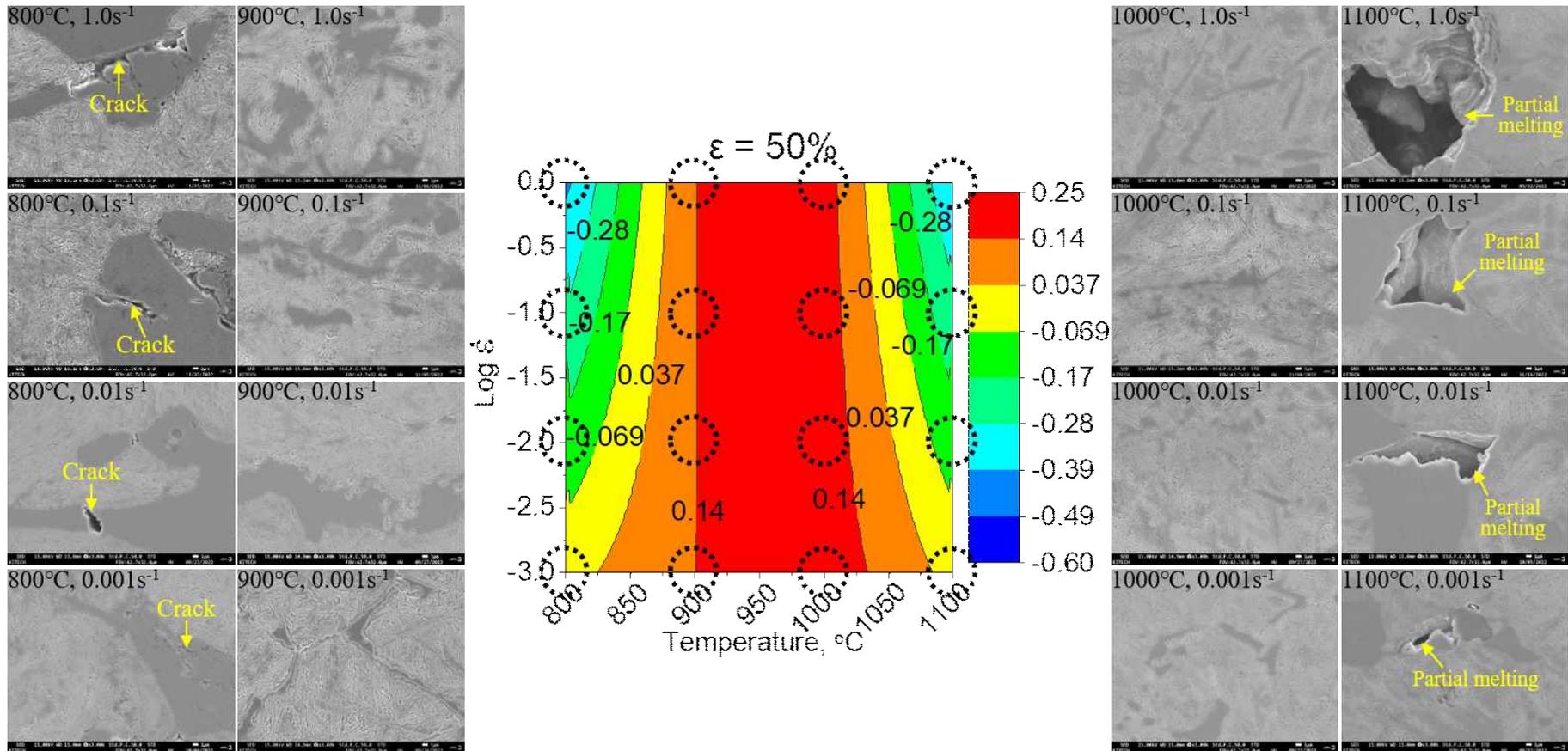


Fig. 54. Reliability between microstructures and instability map obtained at the strain of 50% for adamite with the heating temperature of 1100°C.

## 제 4 절. 고찰

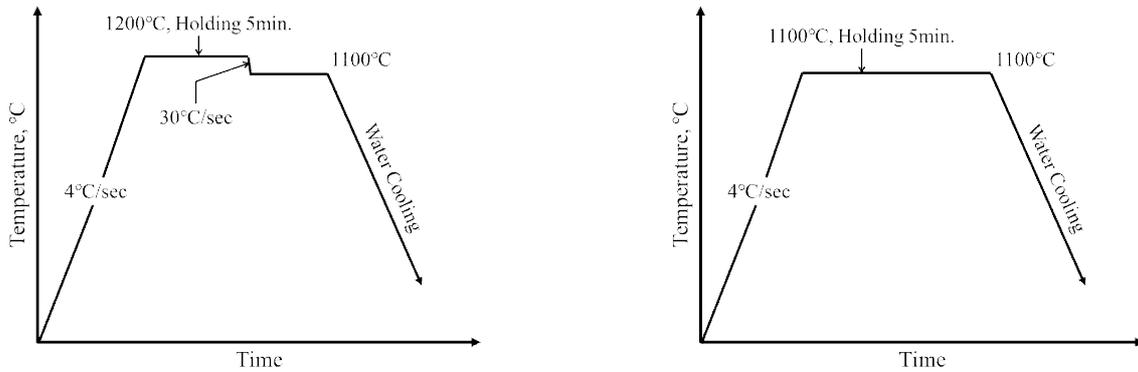


Fig. 55. A schematic diagram of the heat treatment cycles according to the heating temperatures in Gleeble 3800.

### · 가열온도의 영향

가열온도를 1200°C에서 1100°C로 낮추면 압축시험온도 1100°C에서 관찰되는 국부 용융의 크기와 정도는 감소한다. 가열온도에 따라 국부 용융의 양상이 다른 것으로 판단되며, 이에 각 가열온도 1200°C와 1100°C 조건에 따라서 국부적으로 용융이 발생하는 구간과 국부 용융의 양상 및 유무를 고찰하였다.

Fig. 55에서는 Gleeble 3800 장비 내에서 각 가열온도에 따라 압축은 가하지 않은 열처리 사이클에 대한 모식도를 나타내었다. 각 가열온도 1200°C와 1100°C까지 4°C/sec 승온 속도로 가열 후, 5분동안 유지하고 국부 용융이 관찰되는 시험온도인 1100°C까지 냉각 속도 30°C/sec로 급속 냉각하거나 유지하였다. 기존에 고온압축하는 구간에서는 압축을 가하지 않고 시험온도 1100°C에서 유지 완료 후 냉각 과정 중 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 발생한 위치로 탄소의 확산을 막기 위해 기존 공냉과는 달리 수냉 처리하였다.



Fig. 56. Appearances of the specimens at the test temperature of 1100°C according to the heating temperature of (a) 1200°C and (b) 1100°C.

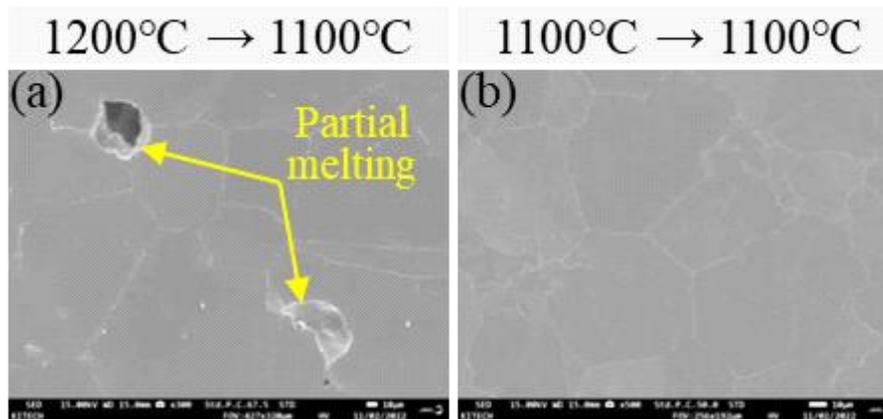


Fig. 57. SEM images of the specimens at the test temperature of 1100°C according to the heating temperatures of (a) The heating temperature of 1200°C and (b) The heating temperature of 1100°C.

Fig. 56에서는 각 가열온도 1200°C와 1100°C 조건에 따른 시험온도 1100°C의 각 시험편 외부형상 이미지를 나타내었다. 1200°C로 가열한 시험편 (a)에서는 외관상 일부 용융이 확인되는 반면, 1100°C로 가열한 시험편 (b)에서는 외관상 용융과 같은 결함은 확인되지 않는다.

Fig. 57에서는 각 가열온도 1200°C와 1100°C 조건에 따른 시험온도 1100°C의 각 시험편 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 1200°C까지 가열하고 1100°C로 급속 냉각한 시험편 (a)에서는 형태가 다른 국부 용융이 동시에 관찰된다. 반면 1100°C까지 가열하고 1100°C로 유지한 시험편 (b)에서는 1200°C까지 가열한 시험편과 다르게 국부 용융은 관찰되지 않는다.

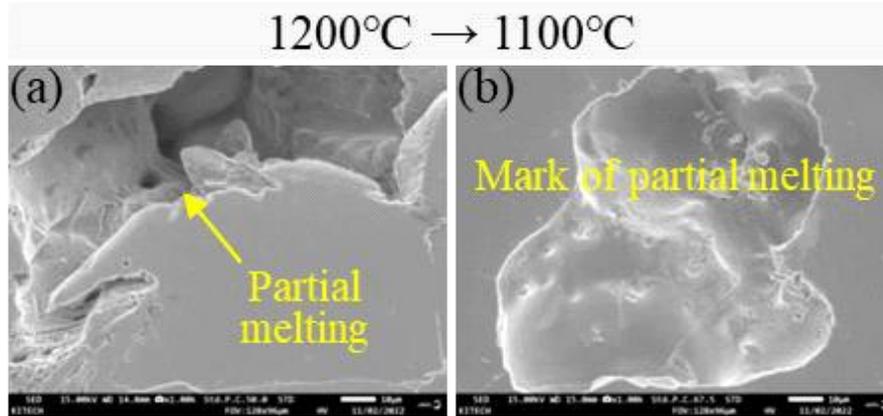


Fig. 58. SEM images of the specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1200°C; (a) Partial melting and (b) Mark of partial melting (High-magnification, x3000).

Fig. 58에서는 1200°C까지 가열하고 1100°C로 급속 냉각한 시험편에서 관찰된 형태가 다른 국부 용융에 대한 고배율의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 1200°C까지 가열하고 1100°C로 급속 냉각한 시험편에서는 형태가 서로 다른 국부 용융이 관찰되는데 Fig. 58 (a)와 같이 앞서 고온압축시험편에서 입계 시멘타이트의 일반적인 국부 용융과 동일한 형태로 관찰된다. Fig. 58 (b)는 1200°C까지 가열하고 1100°C로 급속 냉각하면 앞서 제3장 제4절에서 계산된 아다마이트 소재의 평형 상태도에 의하면 1100°C에서는 고상 영역으로 확인되는데 실제로는 용융 후 충분히 응고되지 못한 국부 용융의 흔적이 관찰된다.

가열온도 1200°C 조건에서 관찰되는 국부 용융은 초기에 가열하는 동안 발생하여 1100°C로 냉각하더라도 그대로 잔존하거나 충분히 응고가 완료되지 못한 상태로 보여진다. 가열온도 1100°C 조건에서는 초기에 가열하고 1100°C에서 유지하는 동안 국부 용융은 관찰되지 않으나, 변형률 50% 조건의 고온압축시험편에서 관찰되는 점으로 보아 압축하는 과정에서 발생하는 것으로 판단되며, 아다마이트 주강의 고온변형 시 변형률에 대한 고려가 필요하다.

## 제 5 절. 결론

아다마이트 주강의 고온변형 시 발생하는 심한 표면 터짐, 크랙 및 국부 용융을 개선하기 위해 기존 가열온도 1200℃를 1100℃ 낮추고 안정한 열간 성형 조건을 도출하기 위해 고온압축시험을 통해 고온 가공성을 평가하였다. 가열온도 1100℃, 변형률 50% 조건에서 작성된 아다마이트 주강의 **Instability map**에 의하면 변형률 속도와 관계없이 성형온도 1040~870℃는 안정한 성형 조건으로 도출되었다. 가열온도 조건을 1200℃에서 1100℃로 낮추면 기존 불안정한 조건인 성형온도 1100℃에서 확인되는 심한 표면 터짐, 크랙 및 국부 용융의 크기와 정도가 감소하였다. 가열온도 1100℃ 조건에서 관찰되는 국부 용융은 초기에 가열하거나 1100℃에서 유지하는 단계에서 발생하지 않았다.

## 제 5 장. 변형률에 따른 아다마이트 주강의 고온변형 거동

### 제 1 절. 서론

아다마이트 주강의 고온변형 시 발생하는 심한 표면 터짐, 크랙 및 국부 용융을 개선하기 위해 가열온도를 1200℃에서 1100℃로 낮추면 국부 용융의 크기와 정도가 감소하지만 여전히 국부 용융이 관찰된다. 가열온도 1100℃ 조건에서 관찰되는 국부 용융은 초기에 가열하거나 유지하는 단계에서 발생하지 않으며 소성 변형하는 과정에서 발생할 수 있다.

본 챕터에서는 아다마이트 주강의 결함이 없는 안정한 열간 성형 조건을 도출하기 위해 각 가열온도 1200℃와 1100℃ 조건에서 기존 변형률 조건인 50%를 30%와 20%로 낮추어 고온압축시험을 통해 변형률에 따른 고온 가공성을 평가하였다.

### 제 2 절. 실험방법

Fig. 59에서는 각 가열온도 1200℃와 1100℃ 조건에서 기존 변형률인 50%를 30%와 20%로 낮춘 고온압축시험의 열처리 사이클에 대한 모식도를 나타내었다. 각 가열온도 1200℃와 1100℃까지 4℃/sec 승온 속도로 가열 후, 5분동안 유지하고 국부 용융이 관찰되는 압축시험온도 1100℃까지 냉각 속도 30℃/sec로 급속 냉각하거나 유지하여 변형률은 30%, 20%로 압축하였다. 이때 압축시험온도 1100℃ 조건에서 변형률 속도는  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$ ,  $0.001s^{-1}$ 의 네 가지 조건으로 각각 달리하여 실시하였으며 압축 완료 후 장비 내에서 공냉 처리하였다.

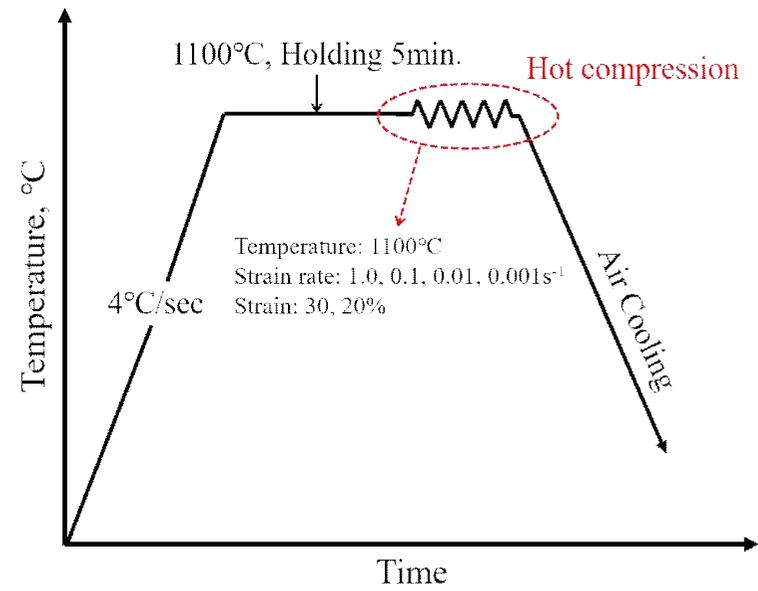
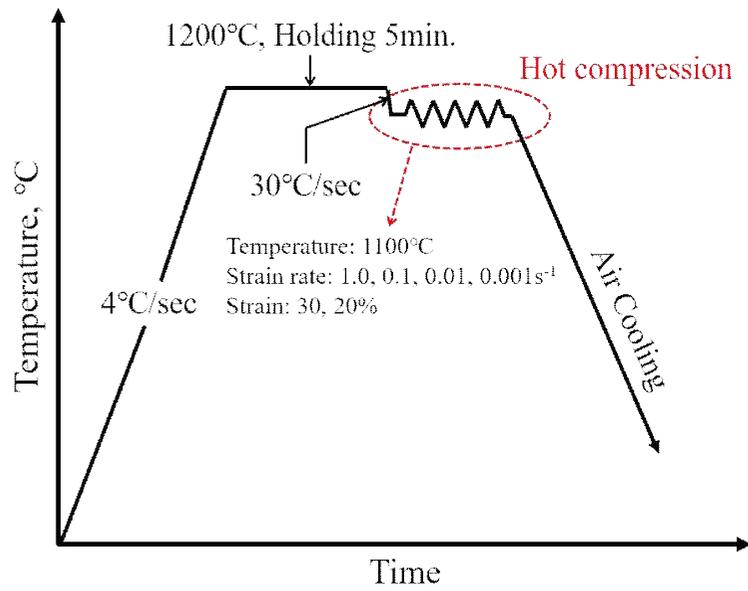


Fig. 59. A schematic diagram of the hot compression test according to the heating temperatures with the strain of 30% and 20%.

### 제 3 절. 결과

#### 1. 고온압축시험편 외부형상

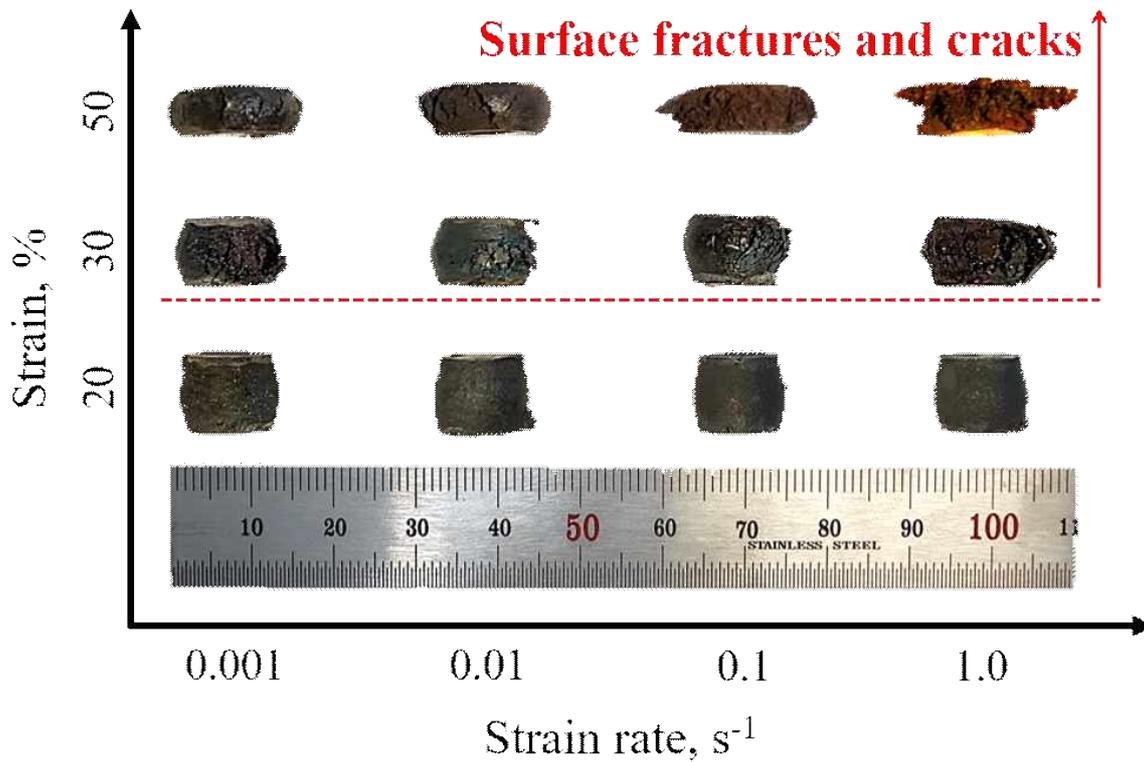


Fig. 60. Appearances of the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1200°C according to the strains.

Fig. 60에서는 가열온도 1200°C, 압축시험온도 1100°C 조건에서 아다마이트 주강의 고온압축시험 후 각 변형률에 따른 시험편의 외부형상 이미지를 나타내었다. 변형률 30% 조건에서는 기존 변형률 50% 조건과 마찬가지로 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되는데 변형률 속도가 0.001~1.0s<sup>-1</sup>로 증가할수록 심하게 관찰된다.

변형률 20% 조건에서는 변형률 50%와 30% 조건과 다르게 모든 변형률 속도 조건에서 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙은 관찰되지 않는다.

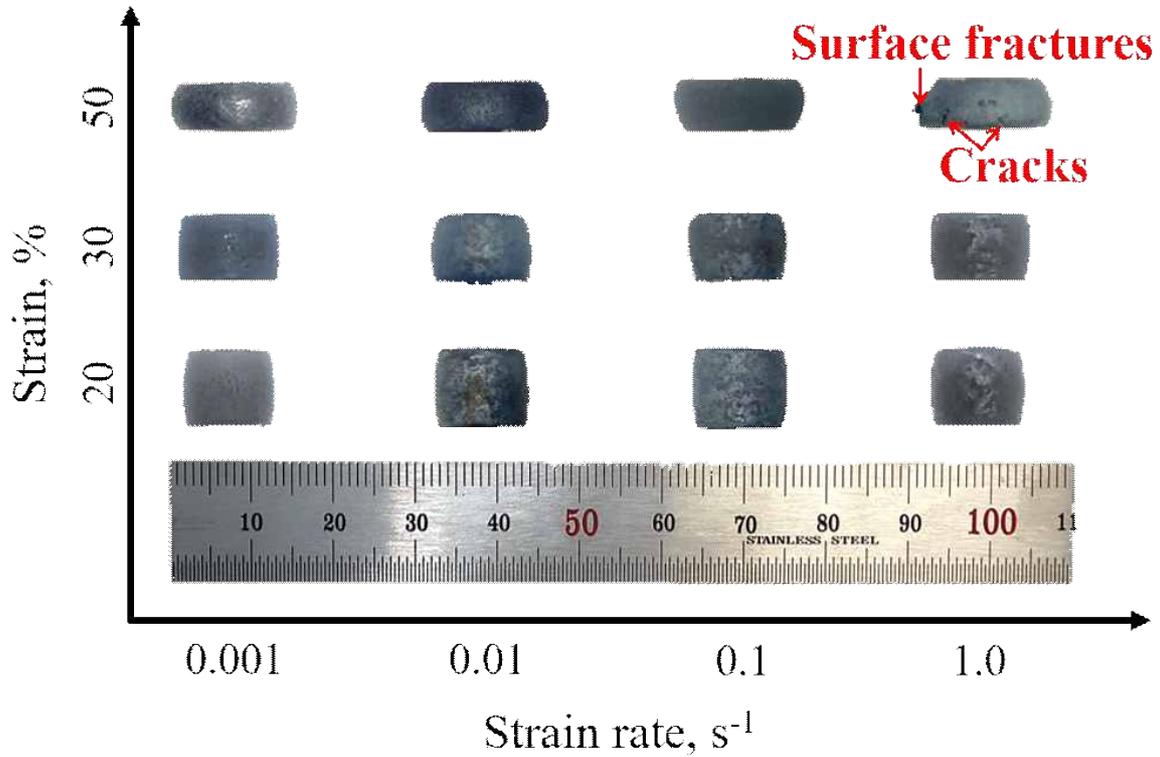


Fig. 61. Appearances of the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the heating temperature of 1100°C according to the strains.

Fig. 61에서는 가열온도 1100°C, 압축시험온도 1100°C 조건에서 아다마이트 주강의 고온압축시험 후 각 변형률에 따른 시험편의 외부형상 이미지를 나타내었다.

기존 변형률 50%에서 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup> 조건에서만 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되며 변형률 30%와 20% 조건에서는 모두 표면 터짐이나 크랙이 관찰되지 않는다.

가열온도 1200°C 조건에서는 변형률 30% 이상인 조건에서부터 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되는 반면, 가열온도 1100°C 조건에선 변형률 30%와 20% 조건 모두 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되지 않는다.

## 2. 미세조직 관찰

아다마이트 고온압축시험편의 미세조직을 관찰하기 위해 FE-SEM을 활용하여 고온압축시험편의 단면 외곽부, 단면 외곽 인접부 및 단면 중심부의 미세조직을 저배율과 고배율에서 각각 관찰하였다.

### 2-1. 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 30% 조건

: 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 62에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 30% 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐이 관찰되며, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서는 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐과 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 함께 관찰된다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 마찬가지로 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐이 관찰되는데 비교적 빠른 변형률 속도 대비 터짐의 정도가 덜하다. 단면 외곽 인접부 (d-2)에서는 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 또한, 표면 터짐과 국부 용융은 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가할수록 심하게 관찰된다.

3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 가열온도 1200℃, 변형률 30% 조건은 변형률 속도와 관계없이 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙이 관찰되는데 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가할수록 심하게 확인된다. 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서도 표면 터짐이 발생한 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 함께 관찰된다.

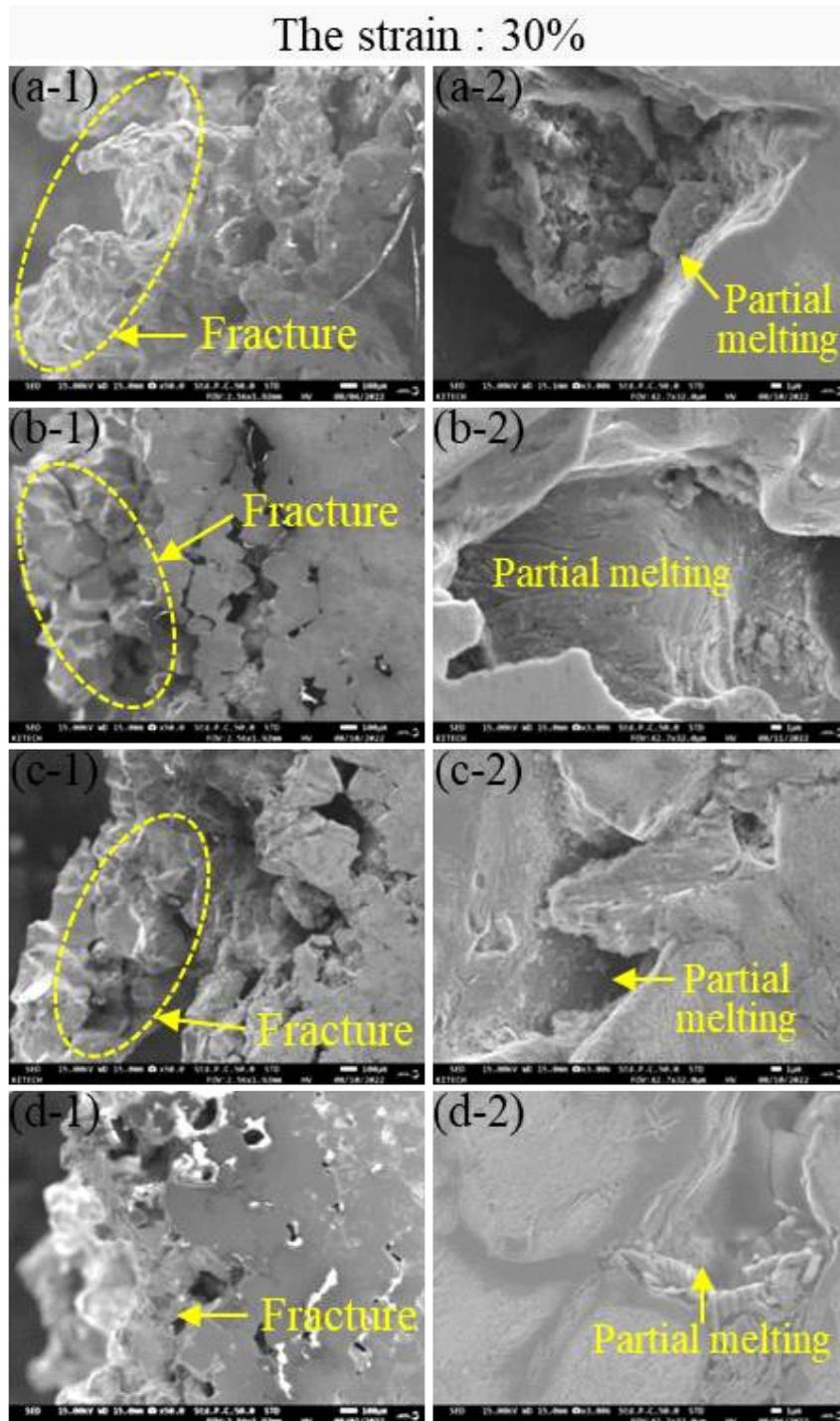


Fig. 62. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 30% and the heating temperature of 1200°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side.

2-2. 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 30% 조건  
 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 63에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 30% 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 단면 중심부의 미세조직은 단면 외곽 인접부와는 다르게 국부 용융이 관찰되지 않으며, 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가하더라도 건전한 미세조직을 나타낸다.

변형률이 50%에서 30%로 감소함에 따라 단면 중심부에서 변형률 속도와 관계없이 관찰된 국부 용융은 모든 변형률 속도 조건에서 관찰되지 않는다.

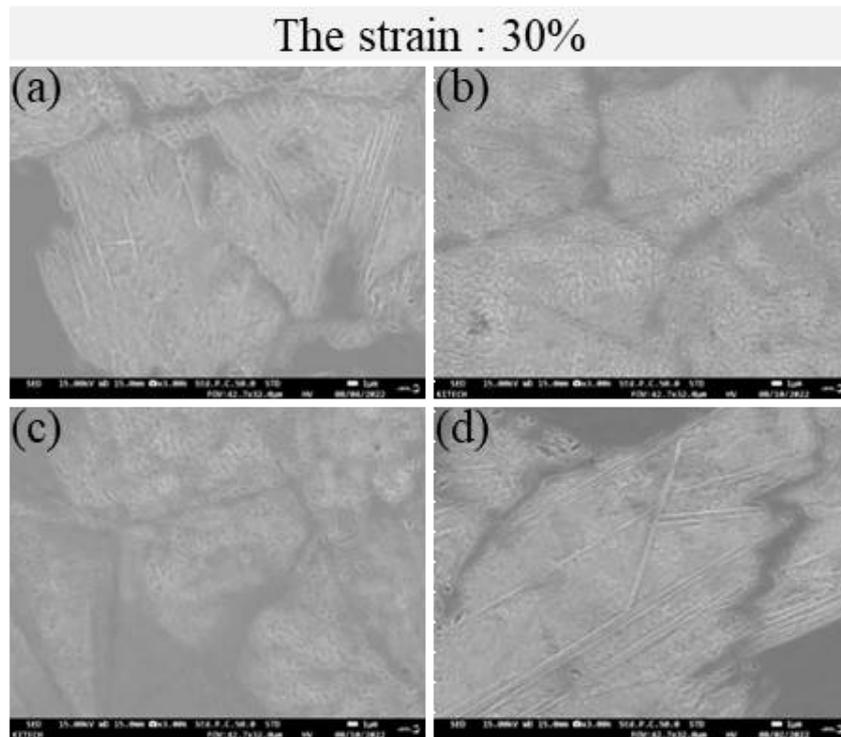


Fig. 63. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100℃ with the strain of 30% and the heating temperature of 1200℃; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ , (c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ .

2-3. 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 20% 조건

: 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 64에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 20% 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 단면 외곽부 (a-1)에서 변형률 30% 조건과 다르게 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서는 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서는 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐이 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부 (d-2)에서도 국부 용융은 관찰되지 않는다.

3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 가열온도 1200℃, 변형률 20% 조건은 모든 변형률 속도 조건에서 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙은 관찰되지 않으나, 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서는 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다.

변형률이 50%에서 20%로 감소함에 따라 단면 외곽부에서 심한 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서는 단면 외곽 인접부에서 국부 용융은 변형률 속도  $0.01s^{-1}$  이상인 조건에서부터 관찰되지만 국부 용융의 크기와 정도가 감소한다.

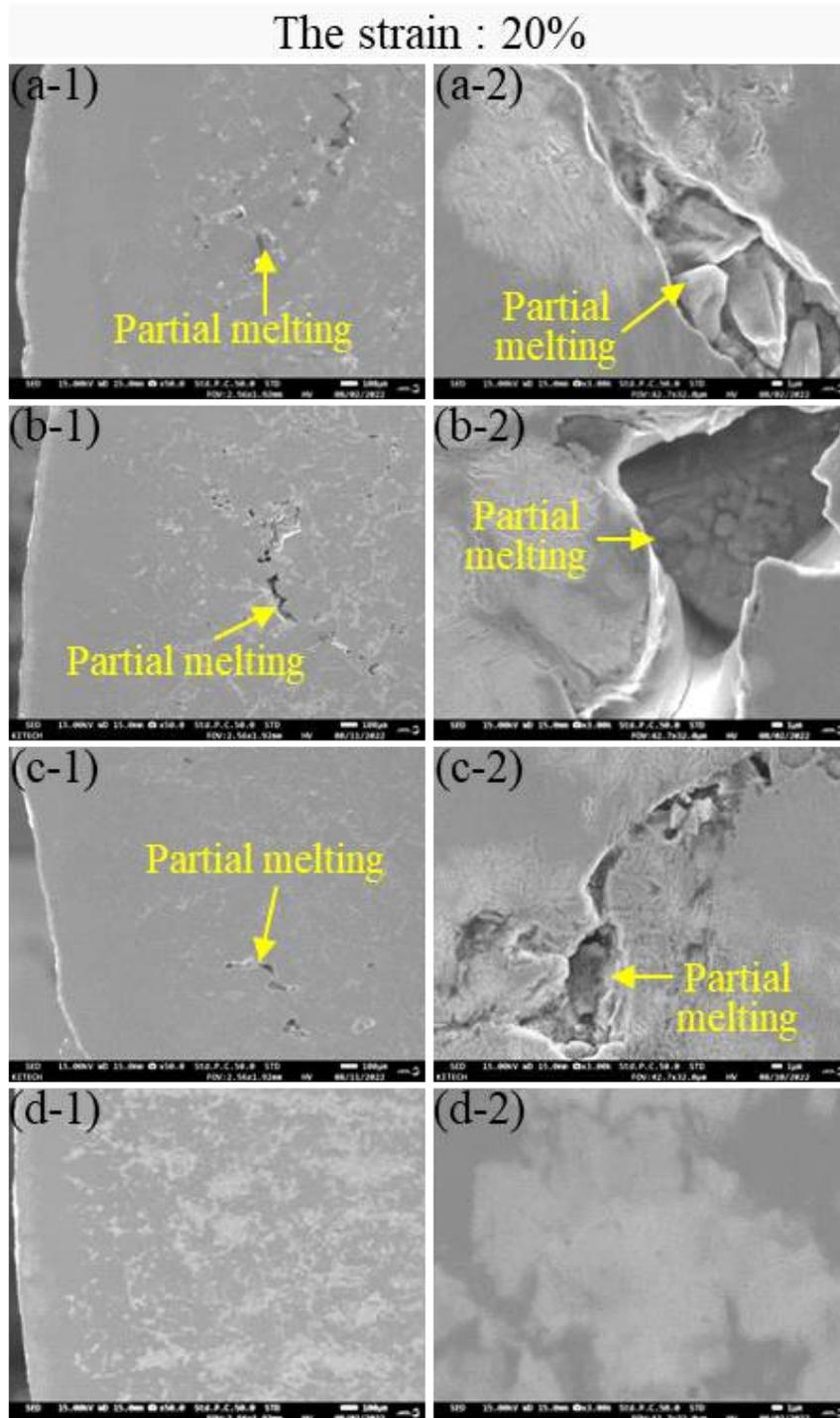


Fig. 64. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 20% and the heating temperature of 1200°C; (a-1)  $1.0s^{-1}$  and (a-2)  $1.0s^{-1}$  : Around the bulged side, (b-1)  $0.1s^{-1}$  and (b-2)  $0.1s^{-1}$  : Around the bulged side, (c-1)  $0.01s^{-1}$  and (c-2)  $0.01s^{-1}$  : Around the bulged side, (d-1)  $0.001s^{-1}$  and (d-2)  $0.001s^{-1}$  : Around the bulged side.

2-4. 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 20% 조건  
 : 단면 중심부 미세조직

Fig. 65에서는 가열온도 1200℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 20% 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 단면 중심부의 미세조직은 단면 외곽 인접부와는 다르게 국부 용융이 관찰되지 않으며, 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가하더라도 건전한 미세조직을 나타낸다.

가열온도 1200℃에서는 변형률 50% 조건을 제외한 변형률 30%와 20% 조건의 경우, 단면 중심부에서는 단면 외곽부와 외곽 인접부와는 다르게 결함은 관찰되지 않는다.

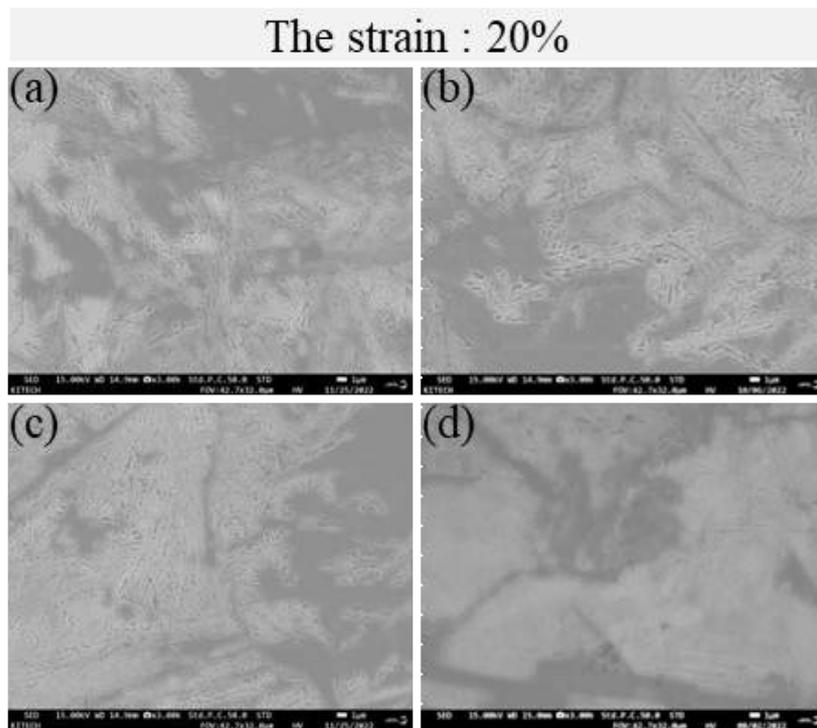


Fig. 65. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100℃ with the strain of 20% and the heating temperature of 1200℃; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ , (c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ .

2-5. 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 30% 조건

: 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 66에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 30% 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서는 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐은 관찰되지 않으나, 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰된다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐은 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부 (d-2)에서는 국부 용융이 관찰된다.

3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 가열온도 1100℃, 변형률 30% 조건은 모든 변형률 속도 조건에서 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙은 관찰되지 않으나, 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서는 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 미세한 국부 용융이 관찰된다.

변형률이 50%에서 30%로 감소함에 따라 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 관찰된 국부 용융의 크기와 정도가 상당히 감소한다.

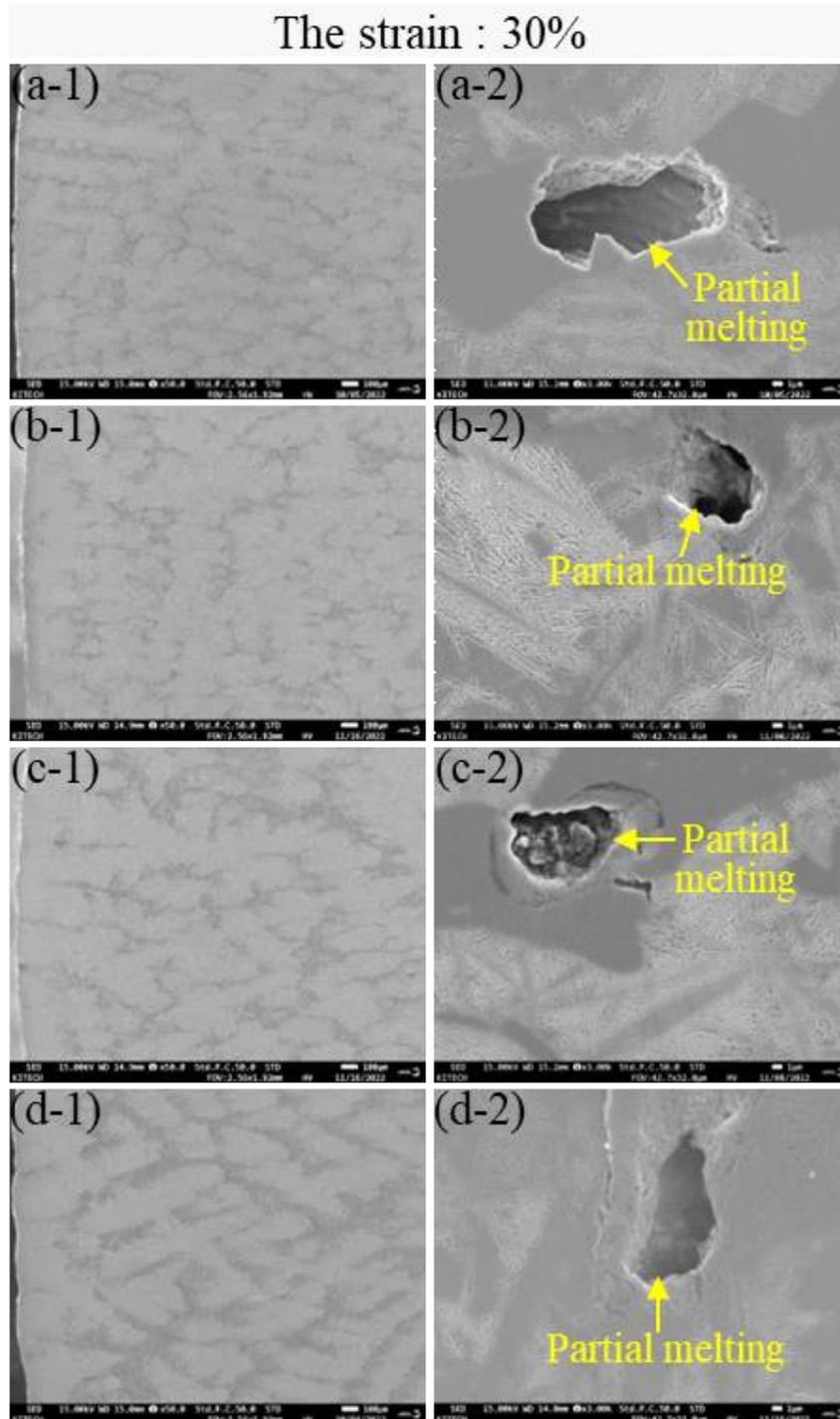


Fig. 66. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 30% and the heating temperature of 1100°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side.



2-7. 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 20% 조건

: 단면 외곽부와 인접부 미세조직

Fig. 68에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 20% 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 외곽부와 단면 외곽 인접부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 가장 빠른 변형률 속도인  $1.0s^{-1}$  조건에서는 단면 외곽부 (a-1)에서 표면 터짐은 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부 (a-2)에서도 입계 시멘타이트에서 국부 용융이 관찰되지 않는다. 변형률 속도  $0.1s^{-1}$ 와  $0.01s^{-1}$  조건에서는  $1.0s^{-1}$  조건과 유사하게 단면 외곽부에서 표면 터짐이 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부에서도 국부 용융은 관찰되지 않는다. 가장 느린 변형률 속도인  $0.001s^{-1}$  조건에서도 단면 외곽부 (d-1)에서 표면 터짐이 관찰되지 않으며, 단면 외곽 인접부 (d-2)에서도 국부 용융은 관찰되지 않는다.

3절 제1항의 아다마이트 주강의 고온압축시험편 외부형상에서 가열온도 1100℃, 변형률 30% 조건은 모든 변형률 속도 조건에서 시험편 외관상 표면 터짐과 크랙은 관찰되지 않으나, 해당 조건의 미세조직 관찰결과에서는 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 미세한 국부 용융이 관찰된다.

변형률이 30%에서 20%로 감소함에 따라 단면 외곽 인접부의 입계 시멘타이트에서 미세하게 관찰된 국부 용융은 전혀 관찰되지 않는다.

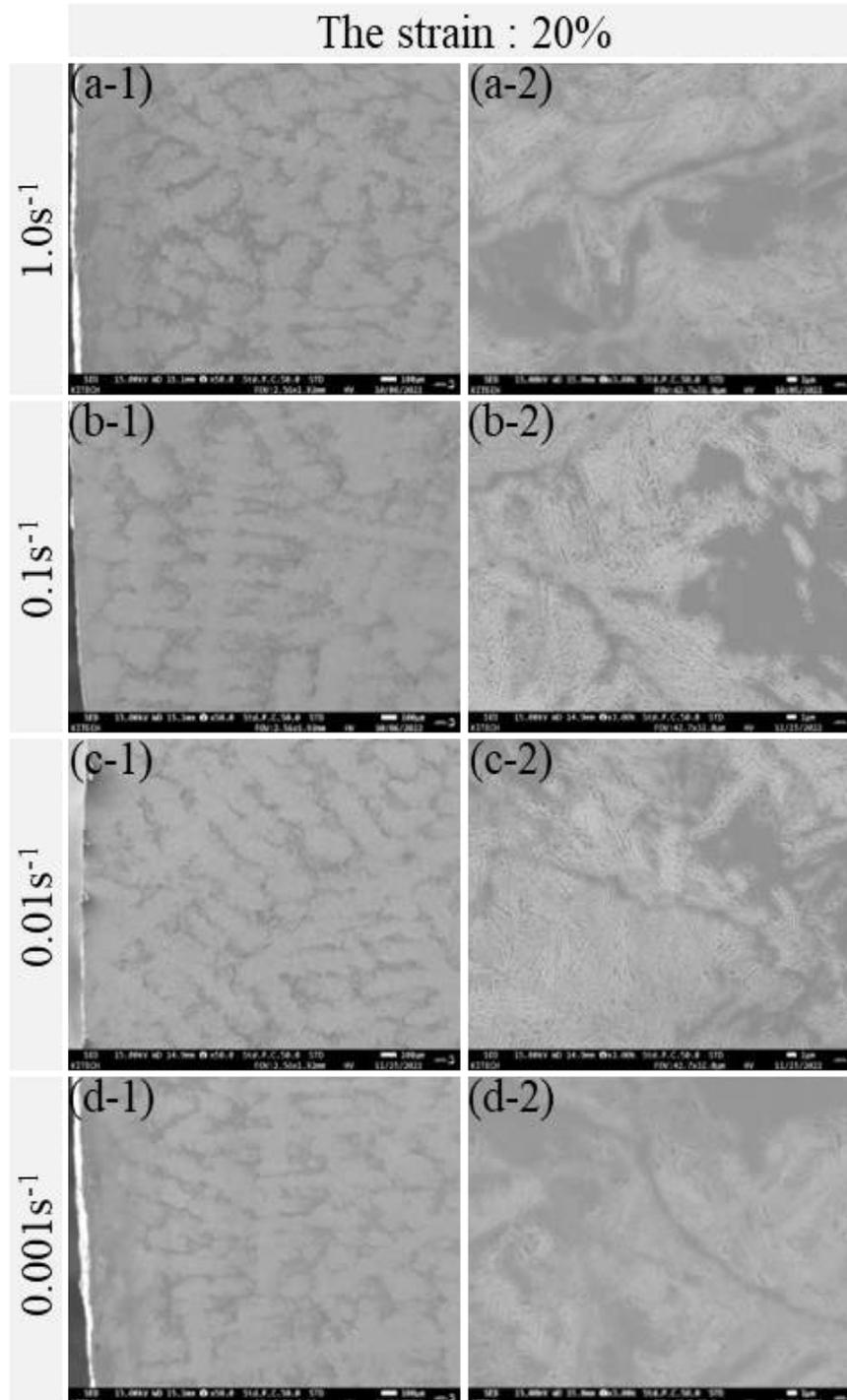


Fig. 68. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain of 20% and the heating temperature of 1100°C; (a-1) 1.0s<sup>-1</sup> and (a-2) 1.0s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (b-1) 0.1s<sup>-1</sup> and (b-2) 0.1s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (c-1) 0.01s<sup>-1</sup> and (c-2) 0.01s<sup>-1</sup> : Around the bulged side, (d-1) 0.001s<sup>-1</sup> and (d-2) 0.001s<sup>-1</sup> : Around the bulged side.

2-8. 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 20% 조건  
: 단면 중심부 미세조직

Fig. 69에서는 가열온도 1100℃, 압축시험온도 1100℃, 변형률 20% 조건에서 변형률 속도  $1.0s^{-1}$ ,  $0.1s^{-1}$ ,  $0.01s^{-1}$  및  $0.001s^{-1}$ 에 따른 단면 중심부의 미세조직 관찰결과를 나타내었다. 단면 중심부의 미세조직은 단면 외곽 인접부와 마찬가지로 국부 용융이 관찰되지 않으며, 변형률 속도가  $0.001\sim 1.0s^{-1}$ 로 증가하더라도 건전한 미세조직을 나타낸다.

가열온도 1100℃에서는 변형률 20% 조건의 경우, 단면 외곽 인접부와 중심부 모두 국부 용융 등 결함이 관찰되지 않는다.

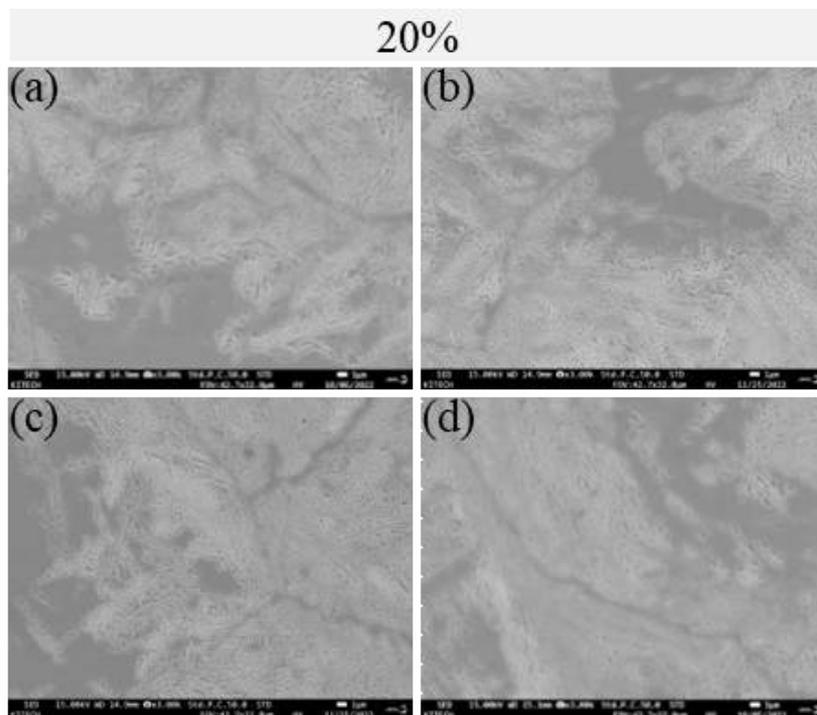


Fig. 69. SEM images on the center of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100℃ with the strain of 20% and the heating temperature of 1100℃; The strain rate of (a)  $1.0s^{-1}$ , (b)  $0.1s^{-1}$ , (c)  $0.01s^{-1}$ , and (d)  $0.001s^{-1}$ .

## 제 4 절. 고찰

### · 변형률의 영향

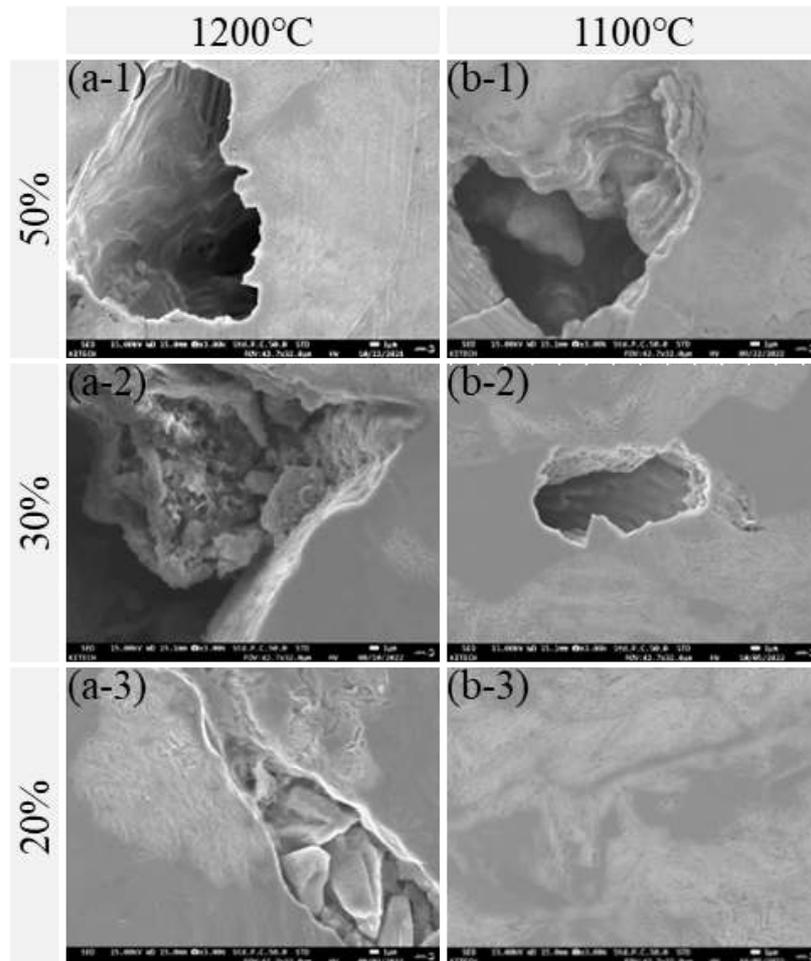


Fig. 70. SEM images on the bulged side of the cross section on the hot compressed specimens at the test temperature of 1100°C with the strain rate of 1.0s<sup>-1</sup> according to the heating temperatures; The strain of (a-1), (b-1) 50%, (a-2), (b-2) 30%, and (a-3), (b-3) 20%.

Fig. 70에서는 각 가열온도 1200°C와 1100°C에서 압축시험온도 1100°C, 변형률 속도 1.0s<sup>-1</sup>의 변형률 50%, 30% 및 20% 조건의 단면 외곽 인접부 미세조직을 나타내었다. 국부 용융은 가열온도가 1200°C에서 1100°C로 감소하고 변형률 속도가 50%에서 30%, 20%로 감소할수록 크기와 정도가 감소하면서 가열온도 1100°C, 변형률 20% 조건에서 전혀 관찰되지 않는다.

아다마이트 주강에서 관찰되는 국부 용융은 제3장 제4절에서 매우 느린 승온 속도로 1100℃까지 가열하거나, 제4장 제4절에서 압축을 가하지 않고 초기에 1100℃까지 승온하고 유지하는 과정에서 발생하지 않는다. 가열온도 1100℃ 조건에서는 변형률 30% 이상인 조건에서부터 국부 용융이 관찰되고 20% 조건에서 완전히 개선되는 것으로 보아 가열온도가 1100℃인 경우, 변형률은 국부 용융에 크게 기인함을 알 수 있다.

국부 용융은 고온변형 시 표면이 터지게 되는 현상을 유발하는 주요 원인으로 작용하기 때문에 국부 용융이 발생하지 않도록 가열온도와 변형률은 제어되어야 할 것으로 사료된다.

## 제 5 절. 결론

아다마이트 주강의 결함이 없는 안정적인 열간 성형 조건을 도출하기 위해 각 가열온도 1200℃와 1100℃에서 기존 변형률 50% 조건을 30%와 20%으로 낮추어 고온압축시험을 통해 고온 가공성을 평가하였다. 각 가열온도 1200℃와 1100℃ 조건에서는 기존 변형률 50% 조건에서 30%와 20%로 감소할수록 표면 터짐, 크랙 및 국부 용융의 크기와 정도가 감소하였다. 가열온도 1200℃에서 가장 낮은 변형률 20% 조건에서는 여전히 국부 용융이 확인되는 반면, 가열온도 1100℃에서 변형률 50%와 30% 조건에서는 가열온도 1200℃ 대비 크기와 정도가 감소한 국부 용융이 확인되는데 20% 조건의 경우, 모든 변형률 속도 조건에서 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않으며 전부 개선되었다. 따라서, 아다마이트 주강의 결함이 없는 안정적인 열간 성형 조건은 가열온도 1100℃ 조건에서 변형률은 20% 이하로 도출되었다.

## 제 6 장. 종합 결론

본 연구에서는 기존에 주조 공정으로 제조되는 열간압연용 아다마이트 워크롤의 미세조직을 치밀하게 만들어주기 위해 열간단조를 적용하기에 앞서 기존의 주강롤보다 결함이 적고 건전한 워크롤 제조 가능성을 검토하고자 가열온도에 따른 고온 압축시험을 통해 고온 가공성을 평가하였다. 각 가열온도 1200℃와 1100℃에서 아다마이트 주강에 소성 변형 적용이 가능하면서도 결함이 없는 안정한 열간 성형 조건을 도출하기 위해 변형률이 아다마이트 주강에 미치는 영향을 고찰하였다. 실험결과로 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 가열온도 1200℃, 변형률 50% 조건에서 작성된 아다마이트 주강의 Instability map에 의하면 변형률 속도와 관계없이 성형온도 1020~880℃는 안정한 성형 조건으로 도출되었다. 불안정한 조건인 성형온도 1100℃에서는 심한 표면 터짐, 크랙 및 입계 시멘타이트에서 다수의 국부 용융이 확인되며, 국부 용융은 1103℃ 이상인 온도에서부터 발생하였다.

2. 아다마이트 주강의 고온변형 시 발생하는 심한 표면 터짐, 크랙 및 국부 용융을 개선하기 위해 가열온도 조건을 1200℃에서 1100℃로 낮추었다. 가열온도 1100℃, 변형률 50% 조건에서 작성된 아다마이트 주강의 Instability map에 의하면 변형률 속도와 관계없이 성형온도 1040~870℃는 안정한 성형 조건으로 도출되었다. 가열온도 조건을 1200℃에서 1100℃로 낮추면 기존 불안정한 조건인 성형온도 1100℃에서 확인되는 심한 표면 터짐, 크랙 및 국부 용융의 크기와 정도가 감소하였다.

3. 아다마이트 주강의 결함이 없는 안정한 열간 성형 조건을 도출하기 위해 각 가열온도 1200℃와 1100℃ 조건에서 기존 변형률 50% 조건을 30%와 20%로 낮추었다. 각 가열온도 1200℃와 1100℃ 조건에서는 기존 변형률 50% 조건에서 30%와 20%로 감소할수록 표면 터짐, 크랙 및 국부 용융의 크기와 정도가 감소하였다. 가열온도 1200℃에서 가장 낮은 변형률 20% 조건에서는 국부 용융이 관찰되는 반면, 가열온도 1100℃에서 가장 낮은 변형률 20% 조건에서는 국부 용융 등 결함은 관찰되지 않았다. 따라서, 아다마이트 주강의 결함이 없는 안정한 열간 성형 조건은 가열온도 1100℃ 조건에서 변형률은 20% 이하로 도출되었다.

## 참고문헌

1. R. Takahashi, Control Engineering Practice., 9 (2001), pp. 987-993
2. H. K. Hsu and J. N. Aoh, Metals., 9 (2019), p. 504
3. N. Hatta, J. I. Kokado, H. Nishimura and K. Nishimura, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan., 21 (1981), pp. 270-277
4. C. W. J. Hol, J. de Roll, L. Kampmeijer, T. Dirkson, G. Schipper, M. La Maire and J. van der Lugt, IFAC Proceedings Volumes., 46 (2013), pp. 397-402
5. Y. C. Suh, J. W. Park and S. H. Kim, In: Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference., (2009), pp. 111-114
6. J. W. Choi, D. G. Kim, S. K. Chang, P. I. Jung and H. S. Han, Journal of Korea Foundry Society., 13 (1993), pp. 146-154
7. I. Kiss, V. Alexa, S. Serban, M. Rackov and M. Cavic, In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering., 294 (2018), p. 012077
8. G. J. Park, M. W. Kang, J. G. Jung, Y. K. Lee and B. H. Kim, Journal of the Korean Society for Heat Treatment, 25 (2013), pp. 72-79
9. C. Li, W. Dai, H. Zhang, Y. Liu and Y. Zhang, Engineering Fracture Mechanics, 238 (2020), p. 107287
10. J. H. Ryu and J. I. Park, In: Proceedings of the Rolls 2000+ Conference., (2000), pp. 91-99
11. Y. Jimbo and A. Azushima, Wear., 249 (2001), pp. 415-421
12. A. Ray, M. S. Prasad, P. K. Barhai and S. K. Mukherjee, Journal of Failure Analysis and Prevention., 4 (2004), pp. 58-66
13. J. W. Ringsberg, International Journal of fatigue., 23 (2001), pp. 575-586
14. P. Palit, S. N. Patel, J. Mathur and S. Shenoy, Journal of Failure Analysis and Prevention., 19 (2019), pp. 1297-1303
15. W. Qiong, S. Da-le, L. Chang-sheng and L. Chun-guang, Engineering Failure Analysis., 15 (2008), pp. 401-410
16. H. Noguchi, H. Hiraoka, Y. Watanabe and Y. Sayama, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan., 28 (1988), pp. 478-484

17. A. Ohnuki, K. Hasuka, K. Nakajima and T. Kawanami, *Advanced Technology of Plasticity.*, 1 (1984), pp. 110-115
18. J. Honda, *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan.*, 24 (1984), pp. 85-100
19. Ž. Domazet, F. Lukša and T. Stanivuk, *International journal of fatigue.*, 59 (2014), pp. 50-63
20. A. Suzuki, *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan.*, 23 (1984), pp. 308-329
21. G. Park, M. W. Kang, J. G. Jung, Y. K. Lee and B. H. Kim, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment.*, 26 (2013), pp. 72-79
22. C. Li, W. Dai, H. Zhang, Y. Liu and Y. Zhang, *Engineering Fracture Mechanics.*, 238 (2020), p. 107287
23. H. J. Mcqueen, C. A. C. Imbert and O. D. Sherby, *In Materials Science Forum.*, 426 (2003), pp. 865-870
24. J. W. Lee, U. G. Kang, Y. S. Lee, K. T. Park and W. J. Nam, *In Materials Science Forum.*, 654 (2010), pp. 318-321
25. S. Çaynak, M. Gürü, A. Biçer, A. Keskin and Y. İcingür, *Fuel.*, 88 (2009), pp. 534-538
26. T. Sasaki, K. Watanabe, K. Nohara, Y. Ono, N. Kondo and S. Sato., *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan.*, 22 (1982), pp. 1010-1020
27. J. Krawczyk, *Archives of Foundry Engineering.*, 10 (2010), pp. 39-44
28. K. C. Hwang, S. Lee and H. C. Lee, *Materials Science and Engineering: A.*, 254 (1998), pp. 282-295
29. HYUNDAI STEEL, *Products Guide PART 02.*, Printed 2017. 07
30. G. Byun, S. Oh, C. G. Lee and S. Lee, *Metallurgical and Materials Transactions.*, 30 (1999), pp. 234-243
31. G. D. Shinde and L. P. Raut, *Int J Adv Eng Res Dev (IJAERD).*, 2 (2015), pp. 161-169
32. Y. V. R. K. Prasad and T. Seshacharyulu, *International Materials Reviews.*, 43 (1998), pp. 243-258
33. H. Ziegler, *Progress in Solid Mechanics*, New York, Willy., 4 (1965), pp. 91-193

34. J. C. Malas III, Ohio University., (1991), pp. 1-178
35. K. Kim, M. Jung and S. J. Lee, Journal of the Korean Society for Heat Treatment., 30 (2017), pp. 187-196
36. H. Lee, H. W. Jeong, S. M. Seo, D. W. Yun, K. H. Yim and Y. S. Yoo, Metals and Materials International., 27 (2021), pp. 691-704
37. M. J. Luton, R. Dorvel and R. A. Petkovic, Metallurgical Transactions A., 11 (1980), pp. 411-420
38. H. J. McQueen and J. J. Jonas, In Treatise on Materials Science & Technology., 6 (1975), pp. 393-493
39. S. I. Lee, H. S. Lim and B. Hwang, Korean Journal of Materials Research., 26 (2016), pp. 535-541
40. A. Fedoriková, T. Kvačkaj, R. Kočíško, R. Bidulský, P. Petroušek, J. Bidulská and L. Domovcová, Acta Metallurgica Slovaca., 22 (2016) pp. 102-110
41. B. H. Jung and M. G. Kim, Journal of the Korean Society for Heat Treatment., 18 (2005) pp. 46-53