

미량합금 원소가 첨가된 2상 조직강의 인장 특성에 미치는 마르텐사이트 분율의 영향

임현석 · 김지연 · 황병철[†]
서울과학기술대학교 신소재공학과

Effect of Martensite Fraction on the Tensile Properties of Dual-phase Steels Containing Micro-alloying Elements

Hyeon-Seok Lim, Ji-Yeon Kim, Byoungchul Hwang[†]

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 139-743, Korea

Abstract In this study dual-phase steels with different ferrite grain size and martensite fraction were fabricated by varying micro-alloying elements and intercritical annealing temperatures, and then the tensile properties were investigated in terms of yield and tensile strengths, elongation, and yield ratio. The addition of micro-alloying elements reduced ferrite grain size, and the increased intercritical transformation temperature increased the martensite fraction. The tensile test results showed that yield and tensile strengths of all the steel specimens increased with increasing the martensite fraction. However, the elongation and yield ratio were differently changed according to variations in the morphology and carbon content of martensite, ferrite grain size, and precipitates resulting from the addition of micro-alloying elements and intercritical annealing.

(Received March 30, 2017; Revised April 6, 2017; Accepted April 10, 2017)

Key words : dual phase steel, micro-alloying elements, martensite fraction, grain size, tensile test

1. 서 론

최근 자동차 및 수송기기 산업에서 연비와 안전성을 향상시키기 위하여 차체 구조의 경량화 및 고강도화가 요구되고 있다. 철강 재료는 다른 경쟁소재에 비해 강도가 우수하면서도 가격이 저렴하여 가장 널리 사용되는 소재이다. 그 중 2상 조직강(dual-phase steel)은 페라이트 기지와 제 2상인 마르텐사이트의 조합으로 구성됨으로써 우수한 연성과 높은 강도의 우수한 기계적 성질을 갖는다. 또한 연속 항복거동 현상과 낮은 항복비로 인하여 높은 가공 경화율과 연신율을 갖기 때문에 활용성이 높다[1].

2상 조직강의 기계적 성질은 페라이트의 결정립 크기, 석출물의 종류, 마르텐사이트의 형상, 평형 탄소 농도, 마르텐사이트 부피분율 그리고 베이나이트 및 잔류 오스테나이트 분율과 같은 다양한 인자에 의존

하는 것으로 알려져 있는데[2, 3], 본 연구에서는 마르텐사이트 분율과 결정립 크기에 따른 인장 특성을 해석하고자 하였다. 마르텐사이트 분율과 결정립 크기는 강도와 연성에 영향을 미치는 주된 인자로 마르텐사이트 분율이 높아짐에 따라 강도는 증가하며, 결정립 크기가 작아질수록 강도와 연신율이 동시에 증가하는 것으로 알려져 있다[4]. 이를 근거로 미량합금 원소를 이용한 결정립 크기 감소와 적절한 마르텐사이트 분율을 통하여 높은 강도와 연성의 조합을 갖는 2상 조직강을 제조하고, 이들의 인장 특성에 미치는 마르텐사이트 분율과 결정립 크기의 영향을 이해하고자 하였다.

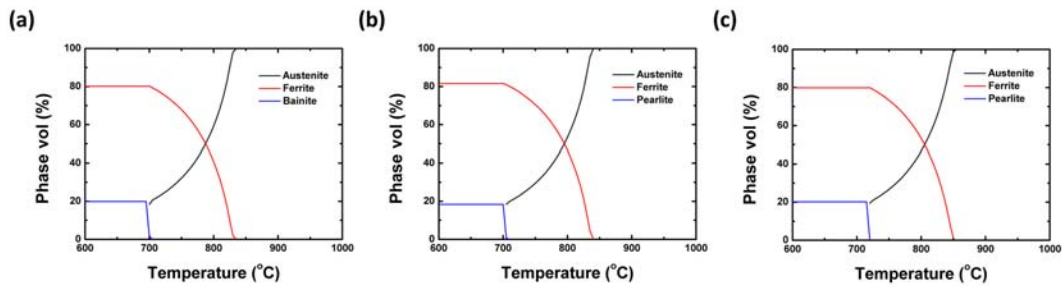
2. 실험 방법

본 연구에서는 0.15C-0.18Si-0.55Mn 조성의 저탄

[†]Corresponding author. E-mail : bhwang@seoultech.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

Table 1. Chemical composition and transformation temperature of the dual-phase steel specimens investigated in this study (wt.%)

Specimen	C	Si	Mn	Al	Ti	Nb	V	N	Transformation temperature (°C)		
									Ar3	A3	A1
Base	0.15	0.16	0.66	0.03	-	-	-	0.008	782	848	719
Nb	0.15	0.18	0.53	0.03	-	0.04	-	0.008	791	849	719
TiNbV	0.15	0.18	0.50	0.03	0.017	0.02	0.1	0.008	803	856	728

**Fig. 1.** Phase volume fraction predicted by thermodynamic calculation with para-equilibrium condition for the dual-phase steel specimens investigated in this study.

소 강을 기본으로 Ti, Nb, V 등의 미량합금 원소 첨가를 달리한 3종의 시편을 제작하였다. 이들 시편의 자세한 화학조성을 Table 1에 나타내고, 'Base', 'Nb', 'TiNbV'로 표기하였다. Base 시편은 기본적으로 C와 Si, Mn, Al, N를 함유하며, Nb 시편은 Base 시편의 조성에 Nb를 0.04 wt.% 첨가하였으며, TiNbV 시편은 Base 시편의 조성에서 Ti를 0.017 wt.%, Nb를 0.02 wt.%, V를 0.01 wt.%를 첨가한 시편이다. 합금에 첨가되는 미량합금 원소의 첨가량을 달리 하여 각각의 영향을 확인하고자 하였다. 이들 합금은 진공용해 후 1,200°C에서 오스테나이트화 처리하고, 950°C 이상에서 열간 압연하였다. 이후 시편 조성을 고려한 동일한 분율의 마르텐사이트를 얻기 위하여 JMatPro 소프트웨어를 이용하여 변태 온도를 계산하였다. 이를 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 이를 근거로 각각 같은 분율을 갖는 페라이트-오스테나이트 2상 영역 온도에서 10분간 유지 후 수냉 처리하였다.

시편을 기계적 연마 이후 4% Nital 용액으로 에칭 후 광학 현미경을 이용하여 결정립 크기를 측정하고, 어둡게 나타나는 마르텐사이트와 밝게 나타나는 페라이트의 분율을 영상 분석기를 이용하여 계산

하였다. 또한 페라이트 상의 결정립 크기 변화를 비교하기 위해 ASTM E112에 제시된 2상 조직에서의 결정립 측정방법을 이용하였다[5]. 한편 인장 특성 평가를 위하여 합금의 압연 방향으로 표점거리 25 mm, 폭 6.3 mm, 두께 2 mm의 판상 형태의 인장 시편으로 가공한 후 10톤 용량의 만능 시험기 (Model: 8516, MTDL, Korea)를 사용하여 10^{-3} s^{-1} 의 변형률 속도로 상온에서 시험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 3종의 시편에 대하여 열처리에 따른 미세조직을 관찰한 사진이다. 모든 미세조직은 두 개의 상으로 구성되어 있는데, 어두운 상은 마르텐사이트, 밝은 상은 페라이트이다. 이는 2상 영역의 오스테나이트화 온도에서 냉각 시 페라이트로 구성되어 있던 부분은 페라이트로 계속 남아있고, 오스테나이트로 존재하던 나머지 부분들이 급냉에 의해 마르텐사이트로 변태되었기 때문이다. 시편들의 마르텐사이트 분율과 결정립 크기와 같은 미세조직적 인자를 Table 2에 나타내었다. 각각의 시편은 마르텐사이트 분율이 약 35, 50, 65%로 구성되어 있는데 이는 마르텐사

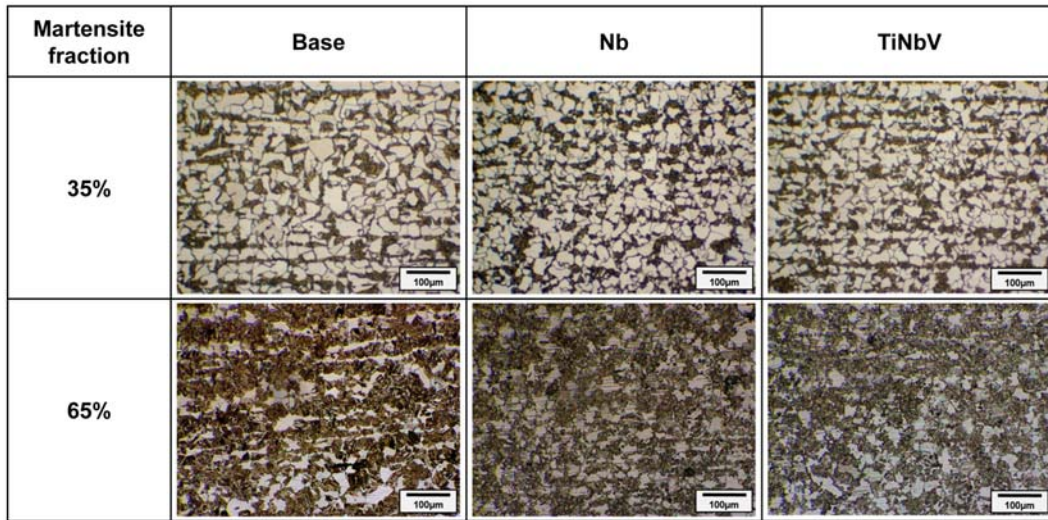


Fig. 2. Optical micrographs of dual-phase steel specimens with different martensite fraction.

Table 2. Intercritical annealing temperature, ferrite grain size, and microstructure fraction for the dual-phase steel specimens

Specimen	Intercritical annealing Temp. (°C)	Grain size (µm)	Microstructure fraction (%)	
			Martensite	Ferrite
Base	760	22.2	35.0	65.0
	800	23.9	50.9	49.1
	815	25.6	65.7	34.3
Nb	765	19.0	35.2	64.8
	800	16.9	50.8	49.2
	820	17.9	64.8	35.2
TiNbV	770	16.7	34.9	65.1
	800	14.7	55.6	44.4
	820	16.3	63.5	36.5

이트 분율이 인장 특성에 끼치는 영향을 관찰하기 위해 성분이 다름에도 유사한 마르텐사이트 분율을 갖도록 다른 온도에서 열처리를 수행하였기 때문이다. 결정립 크기는 미량합금 원소가 첨가된 합금이 더 미세하였다. 이는 미량합금 원소 첨가에 의해 생성되는 석출물 및 고용원소에 의한 결정립계 고정 (pinning) 효과 및 드래깅(dragging) 효과때문이다 [6-10]. 일반적으로 2상 조직강에서 마르텐사이트 분율이 높아짐에 따라 강도는 증가하지만 연신율은 감소하며, 결정립 미세화의 경우 강도와 연신율 모두를 향상시키는 방법으로 알려져 있다[3, 11-12].

본 연구에서의 각 시편의 인장 곡선을 Fig. 3에

나타내고, 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 모든 시편이 동일하게 연속 항복 거동이 나타나는데 이는 2상 조직강의 인장 특성 중 하나로, 원인은 크게 두 가지로 설명된다. 하나는 마르텐사이트가 생성되면서 높은 밀도의 기동전위가 형성되기 때문이며, 다른 하나는 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태되면서 체적 팽창에 의한 페라이트 내부의 잔류 응력에 의한 Bauschinger 효과로 알려져 있다[13-17]. 한편 모든 시편의 경우 마르텐사이트 분율이 늘어남에 따라 강도는 증가하지만 연신율은 저하되었다. Base 시편은 높은 항복 및 인장 강도가 나타났지만, 연신율은 미량합금 원소가 첨가된 시편들에 비해서 낮았다. 또한

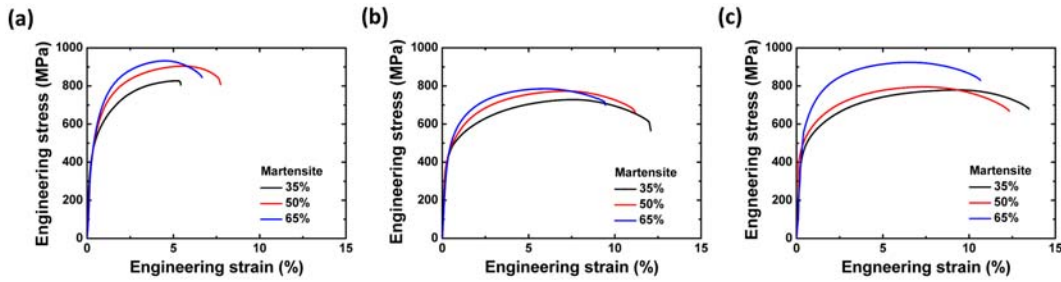


Fig. 3. Room-temperature tensile stress-strain curves of the (a) Base, (b) Nb, (c) TiNbV steel specimens.

Table 3. Tensile properties of the dual-phase steel specimens

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Yield ratio (%)	Uniform elongation (%)	Local elongation (%)
Base	454.7	827.5	5.4	55.0	5.2	0.3
	556.6	904.7	7.7	61.5	5.5	2.2
	553.9	932.4	6.7	59.4	4.5	2.1
Nb	433.9	728.7	12.1	59.5	7.5	4.6
	461.3	773.7	11.2	59.6	6.7	4.5
	498.1	785.7	9.4	63.4	5.9	3.5
TiNbV	468.7	779.5	13.5	60.1	9.4	4.1
	493.1	795.6	12.3	62.0	7.5	4.8
	591.8	924.5	10.7	64.0	6.7	4.0

Base 시편은 마르텐사이트 분율 35% 시편의 연신율이 가장 낮게 나타나며 마르텐사이트 50%의 시편에서 가장 높은 연신율이 나타났다. 미량합금 원소가 첨가된 Nb, TiNbV 시편은 마르텐사이트 분율이 증가함에 따라 연신율이 감소하였다.

이러한 인장 특성의 변화를 면밀히 분석하기 위하여 Fig. 4에 항복비, 균일 연신율, 국부적 연신율을 나타내었다. 항복비(yield ratio)는 소재의 항복 강도와 인장 강도의 비로, 항복비가 커짐에 따라 재료의 변형 능력은 저하되는 것으로 평가된다. 균일 연신율(uniform elongation)은 necking이 발생하기 전 균일한 소성변형이 일어날 때까지의 연신율로 이 또한 재료의 변형능을 평가하는 지표로 사용된다. 한편 국부적 연신율(local elongation)은 necking 이후 불균일한 소성 변형이 일어나기 시작하는 지점에서 파괴되기 전까지의 연신율로 공공 생성 이후의 변형과 주로 관련된다.

항복비는 Base를 제외하고는 마르텐사이트 분율이 늘어남에 따라 대체로 증가하였는데 이는 연질의 페라이트에 비해 강도가 높은 마르텐사이트가 늘어남에

따라 항복 강도가 크게 증가하기 때문이다. 그러나 Base 시편에서는 마르텐사이트 분율이 늘어남에도 불구하고 50%에서 가장 높은 항복비가 나타났다. 이는 상대적으로 강도가 높은 마르텐사이트가 많아짐에 따라 강도가 증가하는 동시에, 마르텐사이트 분율이 늘어남에 따라 마르텐사이트 내부에 존재하는 탄소의 양은 감소하게 된다. 이러한 마르텐사이트의 탄소량 감소는 마르텐사이트의 강도를 저하시키게 된다 [2, 13, 18]. 50% 이상의 높은 분율에서는 위의 두 메커니즘이 동시에 작용되어 50%에 비해 항복 강도의 증가가 크지 않고 인장 강도가 크게 증가하였다. 이로써 항복비가 감소되었음을 알 수 있다. 이에 비해 미량합금 원소가 첨가된 시편은 마르텐사이트 분율이 늘어남에도 항복비가 증가하는데 이는 열처리 온도가 높아질수록 미량합금 원소의 첨가로 인한 석출물의 생성이 촉진되어 항복 강도를 높이기 때문으로 생각된다.

균일 연신율과 국부적 연신율의 경우에는 마르텐사이트 분율에 따라 시편마다 각기 다른 경향을 보였

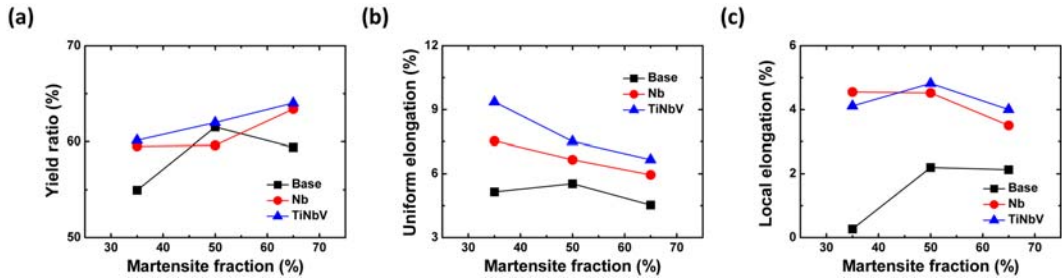


Fig. 4. Variation in (a) yield ratio, (b) uniform elongation, and (c) local elongation as a function of martensite fraction for the Base, Nb and TiNbV steel specimens.

다. 미량합금 원소가 첨가된 시편에서는 균일 연신율이 마르텐사이트 분율이 늘어남에 따라 감소하였지만, Base 시편에서는 50%에서 가장 높게 나타났다. 이러한 현상은 두 가지의 변형 메커니즘으로 인해 발생한다. 첫 번째는 이전에 언급한 것과 같이 마르텐사이트 분율이 늘어남에 따라 마르텐사이트 내부의 탄소량이 감소하게 되어 연질의 마르텐사이트의 변형으로 인하여 연신율이 증가하였다. 두 번째는 2상 조직간의 소성 변형 시 불균일한 응력 집중이 페라이트/마르텐사이트 계면이 가장 많은 50%의 마르텐사이트 분율에서 가장 낮기 때문이다[20]. 연질의 마르텐사이트는 보다 변형이 더욱 쉽게 일어나므로 낮은 마르텐사이트 분율에서 변형이 주로 페라이트에 집중되었던 것과는 달리 높은 마르텐사이트 분율에서는 마르텐사이트에서도 변형이 쉽게 일어날 수 있다. 하지만 미량합금 원소를 첨가한 시편은 열처리 온도가 높아짐에 따라 석출물의 생성 및 성장으로 인하여 석출물에 응력이 집중되어 국부적인 변형을 유도하여 균일 연신율이 비교적 감소하였다.

국부적 연신율은 Base와 TiNbV는 50%의 마르텐사이트 분율에서 가장 높았으며 Nb 또한 35%와 50%의 국부적 연신율이 크게 차이를 보이지 않았다. 이는 낮은 마르텐사이트 분율에서는 페라이트에 변형이 집중되어 주로 페라이트에 공공이 생성되어 파괴로 이어지는 원인이 되지만[13, 21], 마르텐사이트 분율이 증가함에 따라 페라이트 뿐만 아니라 연질의 마르텐사이트에서도 변형이 일어나 상대적으로 공공의 생성이 줄어든다. 이로 인하여 마르텐사이트 분율이 높아질수록 일시적으로 높은 국부적 연신율을 가질 수 있다. Nb 시편의 경우에는 35%의 마르텐사

이트 분율에서도 높은 국부적 연신율을 나타내는데 이러한 차이는 두 미량합금 원소 첨가에 따른 미세 조직의 차이를 통하여 추측하여 볼 수 있다. Fig. 2의 미세조직에서 Nb 시편과 TiNbV 시편은 마르텐사이트 형상의 차이를 보이는데, Nb 시편의 마르텐사이트 형상은 섬과 같은 독립적으로 분리된 형태이지만 TiNbV 시편은 밴드 형태로 서로 이어진 형태로 형성되어 있다[21]. 이러한 마르텐사이트 형상의 차이는 국부적 소성변형이 일어나기 시작할 때 공공의 생성에서 차이를 야기한다. Nb 시편은 TiNbV 시편에 비하여 페라이트/마르텐사이트 계면이 많아 상대적으로 공공의 생성이 균일하게 발생하게 된다[19]. 균일한 공공의 형성은 파괴가 빠르게 진행되어 상대적으로 기계적 특성이 저하되는 결과를 갖게 된다. 하지만 마르텐사이트 분율이 65%까지 증가하게 되었을 때 높은 분율로 인하여 형상의 차이가 크지 않아 큰 차이를 보이지 않는다.

계면에서의 응력 집중 및 공공의 생성을 확인하기 위하여 인장 시험 이후의 파면을 SEM을 이용하여 Fig. 5에 나타내었다. Base 시편의 경우 35%의 파면에서는 일반적인 취성 파면을 보이고, 65%의 파면에서는 취성과 연성 파면이 혼합된 파면이 관찰된다. 이와는 달리 미량합금 원소가 첨가된 시편은 연신율이 높아 주로 연성 파면이 관찰되지만 Nb 시편은 TiNbV 시편에 비해 미세한 덩굴이 많이 형성되었다. 이는 위에 언급한 것과 같이 여러 계면에서 공공의 발생이 분산되어 나타남으로써 비교적 작은 크기의 공공이 다수 생성되었고 이러한 다수의 미세 공공이 인장 시험 중 응력이 분산되는 역할을 하였음을 알 수 있다.

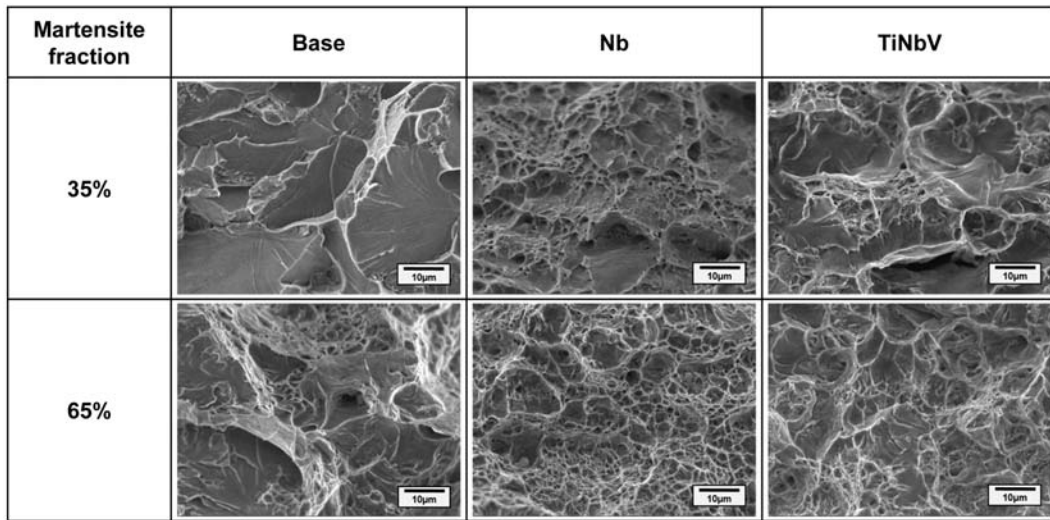


Fig. 5. SEM fractographs of tensile test specimens fractured at room-temperature for the Base, Nb and TiNbV steel specimens.

4. 결 론

본 연구에서는 미량합금 원소 첨가와 2상영역 열처리 온도를 달리하여 2상 조직강을 제조하고, 인장 특성에 미치는 페라이트 결정립 크기 및 마르텐사이트 분율의 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 미량합금 원소를 첨가한 시편은 결정립 미세화에 의하여 연신율은 증가하였으나, 강도에는 크게 영향을 주지 못하였다. 50%의 마르텐사이트의 분율에서 최적의 강도와 연신율이 나타나지만, 미량합금 원소 첨가 시에는 석출물의 생성 및 성장으로 인하여 다른 경향을 나타내었다. 또한 마르텐사이트 분율에 따라 항복비, 균일 연신율과 국부적 연신율의 경우에는 각기 다른 경향을 나타내는데, 이는 마르텐사이트 탄소 함량 및 형상 변화로 인해 다른 소성변형 기구가 작동하기 때문이다. 향후 높은 강도와 가공성을 갖춘 2상 조직강을 제조하기 위해서 미량합금 원소의 첨가뿐만 아니라 인장 특성에 미치는 다양한 미세조직적 인자의 체계적인 연구를 통하여 기계적 특성의 우수한 조합을 갖는 미세조직을 구현하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원

으로 수행되었습니다.

References

1. D. T. Llewellyn and D. J. Hillis : Ironmak. and Steelmak., **23** (1996) 471.
2. A. Bag, K. K. Ray and E. S. Dwarakadasa : Metall. Mater. Trans. A., **30** (1999) 1193.
3. R. G. Davies : Metall. Trans. A., **9** (1978) 671.
4. P. H. Chang and A. G. Preban : Acta Metall., **33** (1985) 897.
5. ASTM : E112, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, West Conshocken (1996)
6. T. Gladman, I. D. McIvor and F. B. Pickering : J. Iron. Steel. Inst., **209** (1971) 380
7. C. Zener and J. H. Holloman : J. Appl. Phys., **15**, (1944) 22
8. T. Gladman : Proc. R. Soc., **294** (1966) 298
9. K. B. Kang, O. Kwon, W. B. Lee and C. G. Park : Scr. Meter., **36** (1997) 1303
10. S. S. Hansen, J. B. Vander Sande and M. Cohen : Metall. Trans. A., **11** (1980) 387
11. S. Kim and S. Lee : Metall. and Mater. Trans. A., **31** (2000) 1753
12. M. Calcagnotto, Y. Adachi, D. Ponge and D. Raabe : Acta Mater., **59** (2011) 658
13. P. Movahed, S. Kolahgar, S. P. H. Marashi, M. Pouranvari and N. Parvin : Mater. Sci. Eng. A., **518** (2009) 1
14. Y. S. Byun, I. S. Kim and S. J. Kim : Trans. Iron

- Steel Inst. Jpn., **24** (1984) 372
15. N. K. Balliger and T. Gladman : Metal. Sci., **15** (1981) 95
16. S. Sodjit and V. Uthaisangsuk : Mater. and Des. **41** (2012) 370
17. A. M. Sarosiek and W. S. Owen : Mater. Sci. Eng. **66** (1984) 13
18. A. Kumar, S. B. Singh and K. K. Ray : Mater. Sci. Eng. A., **474** (2008) 270
19. G. Avramovic-Cingara, C. A. R. Saleh, M. K. Jain and D. S. Wilkinson : Metall. Mater. Trans. A., **40** (2009) 3117.
20. T. S. Byun and I. S. Kim : J. Mater. Sci., **28** (1993) 2923
21. J. W. Lee, S. J. Lee and B. C. De Cooman : Mater. Sci. Eng. A., **536** (2012) 231.