

## 50kg/mm<sup>2</sup>급강의 제조프로세스에 따른 조직특성분석 및 유한요소법을 이용한 기계적 성질예측

배 진호\*, 조 재영\*, 서 동우\*, 오 규환\*, 이 후철\*, 김 결실\*\*, 주 응용\*\*

\*서울대학교 재료공학부, \*\*포항제철 기술연구소

## Microstructural Characterization and Prediction of Mechanical Properties in 50kg/mm<sup>2</sup> Grade Steels according to Manufacturing Process

Jin Ho Bae\*, Jae-Young Cho\*, Dong-Woo Seo\*, Kyu Hwan Oh\*, Hu-Chul Lee\*, G. S. Kim\*\* and W. Y. Choo\*\*

\*School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

\*\*Steel Products and Welding Research Team, Technical Research Laboratory, Pohang Iron and Steel Co, Pohang P.O. Box36, Korea

### Abstract

The deformation characteristics of 50kg/mm<sup>2</sup> grade steels were studied numerically and experimentally to investigate the effects of the size, shape, distribution and volume fraction of the second phase on mechanical properties. Flow curves of ferrite calculated by Tomota's experimental equation was modified to take into account yield point phenomena of steels. The predicted tensile properties by modified Tomota's method were in good agreements with measured data

Key words : 50kg/mm<sup>2</sup> grade steels, yield point phenomena

### 1. 서론

열연강판의 제조과정에서는 냉각개시 온도 및 냉각속도를 다양하게 조절하는 것이 가능하며, 재질요구가 다양화됨에 따라 열연공정의 냉각제어 범위가 확대되고 있다. 이에 따라 다양한 조직을 갖는 복합강재들이 생산되고 있다. 이와 같은 복합강재의 기계적 성질은 각 구성상의 경도, 분율, 분포, 크기 및 형태 등의 조직학적 인자에 의해 지배되며, 이 인자들은 동일한 화학조성 이라도 제조조건에 따라 달라지게 된다. 이와 같이 재료의 미세구조와 기계적 특성과는 매우 밀접한 관계가 있으며 재료의 미세구조를 제어하여 원하는 특성을 가진 재료를 개발하고자 하는 노력들이 현재 여러 분야에서 진행되고 있다.

이 연구에서는 50kg/mm<sup>2</sup>급 강재에 대해서, 열처리 조건에 따른 미세구조를 정량화 하였으며, 이 결과로부터 강재의 기계적 성질을 유한요소법을 이용하여 예측하였다.

### 2. 실험방법

일반 구조용 강재인 SS41, SM50, KL33, AH36강재에 대하여 기계적 성질을 연구하

였다. 표1은 실험강재의 조성, 표2는 각 강재의 열처리 조건이다. 광학현미경과 주사전자현미경으로 강재의 압연방향과 측면의 미세구조를 관찰하여 페라이트의 결정립도와 펄라이트의 층상간격을 결정하였다. 강재의 기계적 성질은 압연방향으로 인장시험을 하여 측정하였다. 인장시편 규격은 지름 6.25mm, 게이지 길이 32mm의 봉상인장시편이었다.

유한요소해석시 필요한 페라이트와 펄라이트 단일조직강재의 유동곡선은 Tomota<sup>1)</sup> 등의 실험식을 사용하여 계산하였으며, 단위셀의 중형비는 펄라이트의 중형비와 같다고 가정하였다. 균일변형률 및 인장강도는 불안정조건을 이용하여 구하였다<sup>2)</sup>.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직의 정량화

그림 1은 열처리하지 않은 SS41강재와 SM50강재의 광학현미경사진이다. Mn의 첨가량이 큰 SM50의 미소띠(microstructural banding)이 SS41보다 현저함을 알 수 있다. 제2상 펄라이트의 형상은 압연방향으로 배열된 직육면체라고 가정하여 다음과 같이 펄라이트의 형상을 정량화하였다. 그림 2와 같이 광학현미경 조직사진의 정해진 분석영역 내에서 h, layer, n<sub>s</sub>, n<sub>r</sub> 와 같은 파라미터들을 조사하였으며, 각 파라미터의 의미는 다음과 같다. h는 canning선과 펄라이트의 교차점의 개수, layer는 분석영역내의 펄라이트 층(layer)의 개수, n<sub>s</sub>는 압연방향측면의 분석영역내의 미소띠 개수, n<sub>r</sub>는 압연방향 앞면의 분석영역내의 미소띠 개수이다.

여기서 fr과 scan을 각각 분석영역 한번의 길이와 분석영역내의 scanning 선의 개수라고 하면 다음과 같은 식이 성립하게 되고,

$$(\text{부피분율}) \times (\text{fr}) \times (\text{scan}) = \text{sum of scanning line length occupied by pearlite}$$

따라서 제2상 펄라이트 한 개의 층의 평균 두께 c는 다음과 같이 표현된다.

$$(\text{펄라이트 두께 } c) = \{ (\text{부피분율}) \times (\text{fr}) \times (\text{scan}) \} / h$$

또한 압연방향으로의 펄라이트의 길이 b와 폭 a는 다음과 같다.

$$(\text{펄라이트 길이 } b) \cdot (\text{펄라이트 두께 } c) = \{ (\text{fr})^2 \times (\text{부피분율}) \} / n_s$$

$$(\text{펄라이트 폭 } a) \cdot (\text{펄라이트 두께 } c) = \{ (\text{fr})^2 \times (\text{부피분율}) \} / n_r$$

위와 같은 계산에 의해서 각 강재의 펄라이트의 형상을 정량화 하였다.

#### 3.2 강도예측모델의 수립

Tomota 등은 항복점현상이 있는 강재의 유동곡선을 Swift 식으로 수식화하기 위해서 항복점연신 이후의 데이터만을 사용하여 페라이트 유동곡선의 계수를 구하였다<sup>1)</sup>. 이러한 방법은 페라이트의 항복강도값을 실제보다 작게 평가하게되어, 유한요소해석에서 구한 유동응력의 항복강도값이 실험값보다 작게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 페라이트의 항복강도를 유동곡선의 0.2% offset 변형률에서 취하지 않고 항복점 연신이 끝나는 변형률에서의 응력으로 계산하였다. 이러한 경우에 강재의 항복점 연신율을 평가하여야 하며 이 연구에서는 인장시험을 통하여 평균적인 항복점 연신율을 이용하였다.

#### 3.3 유한요소해석 결과 및 고찰

그림 3은 수정된 Tomota법을 이용한 유한요소해석과 실험 및 혼합법칙을 이용하여 구한 열처리한 SS41 강재의 유동곡선이고, 그림 4는 KL36 강재의 유동곡선이다. 표 3

에 기본 강재와 열처리한 강재의 실험과 유한요소해석으로 구한 0.2% offset 항복강도, 인장강도 및 균일변형률을 나타내었다. 변형 초기(유효변형률 $\leq 0.1$ )에는 페라이트의 항복점 연신율을 고려한 결과 실험에서 구한 유동곡선의 가공경화속도가 유한요소해석값보다 크나, 큰 변형률(유효변형률 $\geq 0.1$ )에서는 반대로 실험에서 구한 가공경화속도가 작다. 그 이유는 다음과 같다.

연속체모델과 분산강화모델로부터 2상 합금의 유동응력은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = \overline{\sigma_f} + \sigma_B \quad (1)$$

여기서,  $\overline{\sigma_f}$ 는 연한상에서의 평균응력이며,  $\sigma_B$ 는 변형불일치와 관련된 역응력이다.

Jiang<sup>2)</sup> 등은 이상복합강에 대한 해석에서  $\overline{\sigma_f}$ 를 페라이트 기지에서 통계적으로 축적되는 전위밀도와 페라이트 기지 내부에서 기하학적으로 필요한 전위밀도 그리고 페라이트와 마르텐사이트의 계면에서 변형적합성을 만족시키기 위해 기하학적으로 필요한 전위밀도의 함수로 나타내었다. 그리고  $\sigma_B$ 는 페라이트 기지에 불균일하게 분포한 전위로부터 기인한 집적전위의 장범위 내부 응력의 결과 발생한 역응력 임을 나타내었다. Speich<sup>4)</sup> 등은 변형률이 증가할 수록 기하학적으로 필요한 전위의 밀도는 일정하게 되어 이상복합강의 가공경화는 주로 통계적으로 필요한 전위밀도 증가에 의존하게 되는 것을 보였다. 또한 큰 변형률에서 전위구조의 동적인 회복과정이 기하학적으로 필요한 전위의 저장속도를 느리게 하여 가공경화속도는 감소하게 된다.

배진호<sup>5)</sup> 등은 bi-linear 모델에 대한 유한요소해석에서 단위셀의 종횡비가 증가할수록 강재의 항복강도가 증가함을 보였다. 단위셀을 이용한 유한요소해석에서 인장변형 중에 단위셀의 종횡비가 계속 증가하게 되어 강도가 증가하게 되며, 또한 인장변형 중 페라이트 기지의 동적회복과정이 고려되지 못하여 큰 변형률에서 가공경화 속도가 실험값보다 크게 된다. 그러므로 변형 초기에 페라이트 단상 유동곡선에서 항복점 연신율을 고려하여 가공경화속도가 실험값보다 작았지만, 인장강도 및 균일변형률이 실험값보다 크게 된다.

KL36 강재의 경우 예측된 각 단일조직 강재의 유동곡선에서 구한 상계해인 혼합물이 실험값보다 작게 나타난다. 이것은 Tomota가 제안한 단일조직강재의 실험식에서 Al, Ti 및 B의 영향이 고려되지 않은 결과이다. 그러므로, C, Si, Mn, P, Nb 이외의 합금 원소가 첨가된 강재의 기계적 성질의 예측에 Tomota법을 적용하는 것은 좀더 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

#### 4. 결론

(1) 50kg/mm<sup>2</sup>급강재의 미세구조는 판상의 펄라이트가 압연방향으로 배열된 미소띠(microstructural banding) 조직이었다. 페라이트 결정립도와 펄라이트 층상간격을 측정하고 펄라이트의 형상을 판상의 형태로 가정하여 강재의 인장특성을 예측하였다.

(2) 항복점 현상을 나타내는 강재의 유동곡선을 예측하기 위해서 항복점 연신율을 고려한 수정된 Tomota법을 제안하였으며, 이 방법을 이용하여 페라이트-펄라이트 이상복합강재의 인장거동을 해석하였다.

(3) Tomota가 제안한 단일 조직강재의 유동응력 예측식은 C, Si, Mn, P, Nb만을 고려하므로, Al, Ti, B 등이 첨가된 KL36강재의 경우 제안된 강도예측모델에 의해 구해

진 혼합물이 실험에서 구해진 강도보다 낮게 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. Y. Tomota, T. Ohnuki and M. Umenoto : Proc. of the 15th RisØ Inter. Symp. on Mat. Sci. (1994), 595
2. 이 동녕 : 재료강도학, 문운당, 서울(1992)
3. Z. Jiang, Z. Guan and J. Lian : Mat. Sci. and Eng. A190 (1995) 55
4. G. R. Speich and R. L. Miller : Structure and Properties of Dual Phase Steels, Metallurgical Society of AIME, New York, (1979) 145
5. 배 진호, 오 규환 : 대한금속학회지 35 (1997) 887

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	sol-Al	Ti	B
SS41	0.148	0.213	0.458	0.012	0.018	-	-	-
SM50	0.147	0.250	1.29	0.012	0.005	-	-	-
KI33	0.072	0.3	1.41	0.019	0.007	0.05	0.015	18ppm
AH36	0.13	0.25	1.25	-	-	0.035	0.015	-

Table 2. Designation of specimens according to its heat treatment process

Material	Symbol	Heat treatment process
SM50	sm-original	as-received
	sm-900-2h	900°C-2h → air cooling
SS41	ss-original	as-received
	ss-900-1h	900°C-1h → air cooling
KL33	kl-original	as-received
	kl-900-1h	900°C-1h → air cooling
AH36	ah-original	as-received
	ah-900-1h	900°C-1h → air cooling

Table 3. Experimental and calculated material properties of steels

Material		Yield stress(MPa)		Uniform elongation		Tensile stress(MPa)	
		Exp.	FEM	Exp.	FEM	Exp.	FEM
SM50	sm-origianl	392	410	0.20	0.25	614	611
	sm-900-2h	392	427	0.22	0.22	638	706
SS41	ss-original	299	290	0.20	0.26	535	524
	ss-900-1h	326	333	0.22	0.30	546	601
KL33	kl-original	393	380	0.19	0.20	578	560
	kl-900-1h	370	338	0.24	0.17	581	556
AH36	ah-original	381	377	0.19	0.23	593	615
	ah-900-1h	364	357	0.23	0.27	587	603

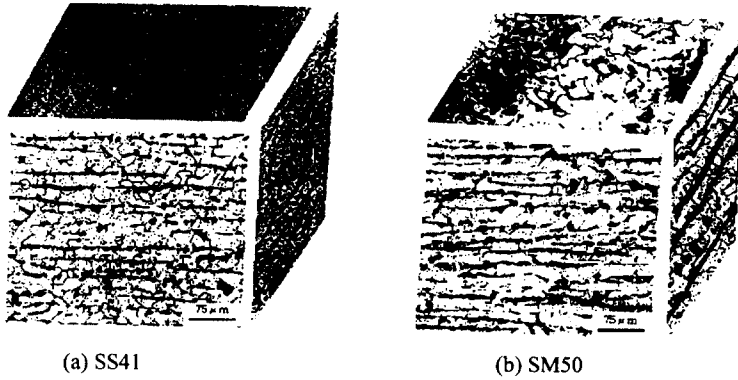


Fig. 1 Optical micrograph of SS41 and SM50

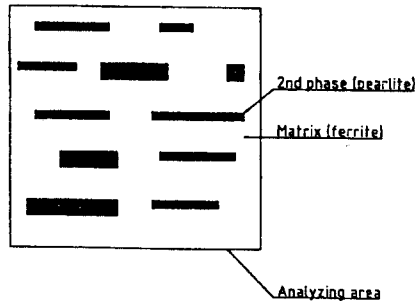


Fig. 2 Schematic diagram showing cross-section of specimen

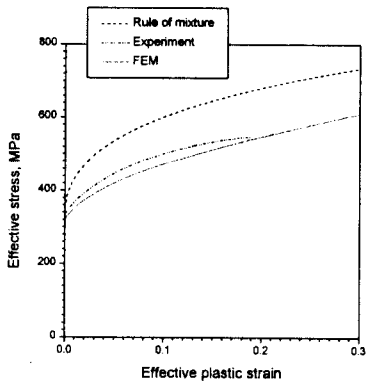


Fig. 3 Experimental and calculated stress-strain curves of SS41 steel

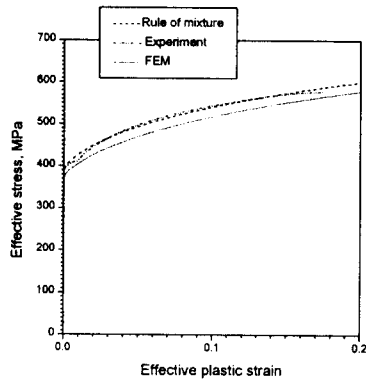


Fig. 4 Experimental and calculated stress-strain curves of KL36 steel