



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2011년03월24일  
(11) 등록번호 10-1024709  
(24) 등록일자 2011년03월17일

(51) Int. Cl.

C22C 38/00 (2006.01) C21D 8/02 (2006.01)

C22C 38/58 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2009-7019101

(22) 출원일자(국제출원일자) 2008년03월03일

심사청구일자 2009년09월14일

(85) 번역문제출일자 2009년09월14일

(65) 공개번호 10-2009-0110384

(43) 공개일자 2009년10월21일

(86) 국제출원번호 PCT/JP2008/053766

(87) 국제공개번호 WO 2008/108333

국제공개일자 2008년09월12일

(30) 우선권주장

JP-P-2007-054279 2007년03월05일 일본(JP)

(56) 선행기술조사문헌

JP2002241891 A

JP2005097694 A

KR1020030081050 A

전체 청구항 수 : 총 6 항

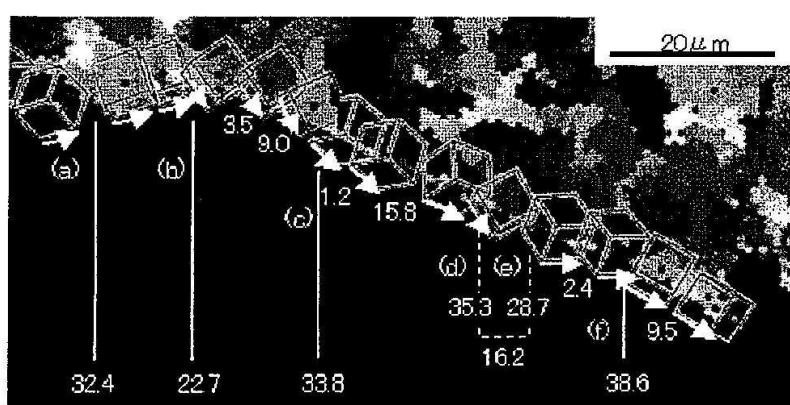
심사관 : 이성준

(54) 두꺼운 고강도 강판 및 그 제조 방법

### (57) 요 약

Ni 함유 강으로 이루어지고, 베이나이트 주체 조직 또한 펠라이트 분율 5% 이하이며, 표리면 판 두께 5% 표층 영역에서의 원상당 직경  $25\mu\text{m}$  초과의 조대 페라이트 분율이 10% 이하이고, 시멘타이트의 평균 원상당 직경이  $0.5\mu\text{m}$  이하이며, 판 압연 방향에 수직한 단면 내의, 상기 표층 영역을 제외한 내부 영역을, 등방위 영역마다로 구분하여 절단법의 측정선을 판 두께에 평행한 T 방향으로 그리고, 측정선 상에서 원상당 직경이  $8\mu\text{m}$  미만인 등방위 영역을 제외하고, 연속하여 이웃하는 복수의 등방위 영역의 <001>축의 T 방향에 가장 가까운 <001>축끼리가 서로 이루는 각도가  $20^\circ$  미만인, 상기 등방위 영역은 하나의 등균열 전파 저항 영역으로 간주할 때, 상기 등균열 전파 저항 영역의 평균 원상당 직경이  $d=(7.11\times[\text{Ni}]+11)\times(1.2-t/300)(\mu\text{m})$  이하인 것을 특징으로 하는 두꺼운 고강도 강판.

대 표 도 - 도1



(72) 발명자

고지마 아끼히코

일본 1008071 도쿄도 지요다구 오오떼마찌 2조메  
6방 3고 신닛쁜세이테쓰 가부시키카이샤 내

다나까 요오이찌

일본 1008071 도쿄도 지요다구 오오떼마찌 2조메  
6방 3고 신닛쁜세이테쓰 가부시키카이샤 내

---

## 특허청구의 범위

### 청구항 1

질량%로, C : 0.052 내지 0.14%, Si : 0.03 내지 0.5%, Mn : 0.3 내지 2.0%, P : 0.020% 이하, S : 0.010% 이하, Ni : 0.5 내지 4.0%, Nb : 0.005 내지 0.050%, Ti : 0.005 내지 0.050%, Al : 0.002 내지 0.10%, N : 0.0010 내지 0.0080%를 함유하고, 잔량부 Fe 및 불가피적 불순물로 이루어지며, 또한 하기 수학식 1로 규정되는  $C_{eq}$ 가 0.30 내지 0.50%이며,

체적분율로 하여 60% 이상의 베이나이트를 주체로 하는 마이크로 조직으로서, 또한 펠라이트 분율이 5% 이하이며, 또한 표면으로부터 각각 판 두께의 5% 깊이까지의 표층 영역에 있어서의 마이크로 조직에 대해서는, 원상당 직경이  $25\mu\text{m}$  초과인 조대 페라이트의 분율이 10% 이하이며, 또한 시멘타이트의 평균 원상당 직경이  $0.5\mu\text{m}$  이하이며,

판 압연 방향에 수직한 단면을 T 단면으로 하고 상기 T 단면 내의 판면에 평행한 방향을 T 방향으로 할 때, 상기 T 단면 내의 상기 표층 영역을 제외한 내부 영역에 대해, 후방 산란 전자 회절(Electron Back Scattering Pattern)을 사용한 결정 방위 해석을 행하여, 상기 T 단면 조직을 결정 방위가 동등한 영역(등방위 영역)마다로 구분하고, 또한 상기 등방위 영역으로 구분된 T 단면 조직에, JIS G 0551에 준거한 절단법을 적용하여, 상기 T 방향의 임의의 측정선을 긋고, 상기 측정선 상에서 원상당 직경이  $8\mu\text{m}$  미만인 등방위 영역을 제외하고, 연속하여 이웃하는 복수의 원상당 직경이  $8\mu\text{m}$  이상인 등방위 영역의 각각 3개의 <001>축 중에서 상기 T 방향에 가장 가까운 <001>축끼리가 서로 이루는 각도(균열 전파 편향각)가  $20^\circ$  미만인, 상기 측정선 상에서 연속하여 이웃하는 복수의 등방위 영역에, 상기 측정선 상에서 상기 원상당 직경이  $8\mu\text{m}$  이상인 등방위 영역 중 어느 하나에 인접하는 원상당 직경이  $8\mu\text{m}$  미만인 등방위 영역도 아울러 하나의 영역(등균열 전파 저항 영역)으로 간주할 때, 상기 등균열 전파 저항 영역의 상기 절단법에 의해 산출되는 평균 원상당 직경(유효 결정립 직경)이  $8\mu\text{m}$  이상, 하기 수학식 2의  $d(\mu\text{m})$  이하인 것을 특징으로 하는, 두께  $50\text{mm}$  이상의 두꺼운 고강도 강판.

<수학식 1>

$$C_{eq} = [C] + [Mn]/6 + ([Cu] + [Ni])/15 + ([Cr] + [Mo] + [V])/5$$

<수학식 2>

$$d = (7.11 \times [Ni] + 11) \times (1.2 - t/300)$$

여기서, [X]는 원소 X의 함유량(질량%), t는 판 두께( $\text{mm}$ )를 나타낸다.

### 청구항 2

제1항에 있어서, 질량%로, Cu : 0.05 내지 1.5%, Cr : 0.05 내지 1.0%, Mo : 0.05 내지 1.0%, V : 0.005 내지 0.10%, B : 0.0002 내지 0.0030%의 1종 또는 2종 이상을 더 함유하는 것을 특징으로 하는, 두께  $50\text{mm}$  이상의 두꺼운 고강도 강판.

### 청구항 3

제1항에 있어서, 질량%로 Mg : 0.0003 내지 0.0050%, Ca : 0.0005 내지 0.0030%, REM : 0.0005 내지 0.010%의 1종 또는 2종 이상을 더 함유하는 것을 특징으로 하는, 두께  $50\text{mm}$  이상의 두꺼운 고강도 강판.

### 청구항 4

제1항에 있어서, 질량%로, Mg : 0.0003 내지 0.0050%, Ca : 0.0005 내지 0.0030%, REM : 0.0005 내지 0.010%의 1종 또는 2종 이상을 더 함유하는 것을 특징으로 하는, 두께  $50\text{mm}$  이상의 두꺼운 고강도 강판.

### 청구항 5

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 기재된 조성을 갖는 강편을, 950 내지 1150°C로 가열하고, 900°C 이상의 온도에서 누적 압하율 30% 이상의 조압연을 행한 후, Ar<sub>3</sub> 이상, 하기 수학식 3의 T(°C) 이하의 온도로, 또한 40% 이상의 누적 압하율로 마무리 압연을 행하고, 계속하여 Ar<sub>3</sub> 이상의 온도로부터 판 두께 평균으로  $8\text{mm}/\text{s}$  이상

의 냉각 속도로 500°C 이하의 온도까지 가속 냉각을 행하는 것을 특징으로 하는, 두께 50mm 이상의 두꺼운 고강도 강판의 제조 방법.

<수학식 3>

$$T = (37 \times [Ni] + 810) \times (1.1 - t/500)$$

여기서, [Ni]은 Ni 함유량(질량%), t는 판 두께(mm)을 나타낸다.

## 청구항 6

제5항에 있어서, 상기 가속 냉각 종료 후, 300 내지 600°C의 온도에서 템퍼링 처리하는 것을 특징으로 하는, 두께 50mm 이상의 두꺼운 고강도 강판의 제조 방법.

## 명세서

### 기술 분야

- [0001] 본 발명은, 취성 균열 전파 정지 특성(이하, 어레스트성이라고도 한다)이 우수한 두꺼운 고강도 강판(이하, 두꺼운 고강도 고 어레스트 강판 또는 고 어레스트 강판이라고도 한다) 및 그 제조 방법에 관한 것이다.
- [0002] 특히, 본 발명은 판 두께 50mm 이상의 두꺼운 재료(이하, 두꺼운 재료라고도 한다)이며, 항복 강도 390 내지 460MPa급이어도  $K_{ca}=6000N/mm^{1.5}$ 로 되는 온도[이하, 어레스트성 지표( $T_{Kca-6000}$ )라고도 한다]가 -10°C 이하로 되는, 취성 균열 전파 정지 특성이 우수한 두꺼운 고강도 강판 및 그 제조 방법에 관한 것이다.
- [0003] 또한, 본 발명을 적용한 강판은, 조선, 건축, 교량, 탱크, 해양 구조물 등의 용접 구조물에 적용된다. 또한, 본 발명 강판은, 강판, 컬럼 등에 가공한 2차 가공품으로서 유통되는 경우도 있다.
- [0004] 출원은, 2007년 3월 5일에, 일본에 출원된 특허 출원 제2007-54279호에 기초하여 우선권을 주장하고, 그 내용을 여기에 원용한다.

### 배경 기술

- [0005] 최근의 강구조물의 대형화에 수반하여 사용되는 강재의 두꺼운 고강도화와 함께, 안전성 확보의 관점에서 취성 균열 전파 정지 특성(어레스트성)에 대한 요구가 까다로워지고 있다. 그런데, 일반적으로 강도나 판 두께가 커지면, 어레스트성의 확보는 급격하게 곤란함을 증가시켜, 강구조물의 두꺼운 고강도 강판의 적용을 저해하는 요인으로 되고 있다. 동시에 수요자의 짚은 납기화에 대한 요망도 해마다 커져 강판 제조 공정에 있어서의 생산성 향상이 강하게 요구되고 있다.
- [0006] 강재의 어레스트성을 향상시키는 약금학적인 요인으로서는, (i) 결정립 미세화, (ii) Ni 첨가, (iii) 취화 제2상 제어, (iv) 집합 조직 제어 등이 알려져 있다.
- [0007] (i)의 결정립을 미세화하는 방법에 대해서는, 특히 문헌1(일본 특허 출원 공개 평02-129318호 공보)에 기재된 기술이 있다. 이것은,  $Ar_3$ 점 이상의 미 재결정 영역에서 압하율 50% 이상의 압연을 실시한 후, 700 내지 750°C의 범위에서 30 내지 50%의 2상 영역 압연을 행하는 방법이다. 또한, 강판의 결정립을 미세화하는 특수한 방법으로서, 압연 전 또는 조압연 종료 후에 강편 표면을 냉각하여, 내부와의 온도차를 발생시킨 상태로 압연 개시하여 복열(復熱)시킴으로써 표층부에 미립 페라이트를 생성시키는 방법이 특히 문헌2(일본 특허 공고 평06-004903호 공보), 특히 문헌3(일본 특허 출원 공개 제2003-221619호 공보)에 기재되어 있다.
- [0008] (ii)의 Ni 첨가는, 저온 영역에 있어서의 교차 슬립(cross slip)을 조장함으로써, 취성 균열의 전파를 억제하여 (비)특허 문헌1 : 다무라이마오 저, 「철강 재료 강도학」, 일간 공업 신문사 발행, 1969년 7월 5일, p.125 참조), 매트릭스의 어레스트성을 향상시키는 것으로 알려져 있다(비)특허 문헌2: 하세베, 카와구치, 「테이퍼형 DCB 시험에 의한 Ni 첨가 강판의 취성 파괴 전파 정지 특성에 대해서」, 철과 강, vol.61(1975), p. 875 참조).
- [0009] (iii)의 취화 제2상을 제어하는 방법으로서는, 특히 문헌4(일본 특허 출원 공개 소59-047323호 공보)에 기재된 기술이 있다. 이것은, 모상의 페라이트 내에 취화상인 마르텐사이트를 미세 분산시키는 기술이다.
- [0010] (iv)의 집합 조직 제어에 관해서는, 극저탄소의 베이나이트 강으로 저온 대압 하 압연을 행하여 압연면에 병행

하여 (211)면을 발달시키는 방법이 특허 문헌5(일본 특허 출원 공개 제2002-241891호 공보)에 기재되어 있다.

### 발명의 상세한 설명

- [0011] 그러나, 특허 문헌1에 기재된 방법은, 마이크로 조직이 페라이트 주체이므로 강도가 비교적 낮고, 판 두께도 20  $\mu\text{m}$  정도의 저온용 강을 대상으로 한 것이다. 그로 인해, 본 발명이 대상으로 하는 판 두께 50  $\mu\text{m}$  이상의 두꺼운 재료에 적용할 경우에는, 슬래브 두께의 관점에서 압하율 확보가 곤란하다. 또한, 온도 대기 시간이 길어져 생산성이 현저하게 저하되어 버린다는 문제가 있다.
- [0012] 또한, 동일 문헌에 기재된 방법에서는, 항복 강도 390MPa 이상을 확보하는 것도 어렵다.
- [0013] 특허 문헌2, 3에 기재되어 있는 발명을, 본 발명이 대상으로 하는 두꺼운 재료에 적용하려고 하는 경우에는, 조직 형태가 동일해도 어레스트성 확보는 곤란해져, 표층 페라이트 미세화에 의한 효과는 상대적으로 작아진다고 하는 문제가 있다. 또한, 제조 프로세스로서도 판 두께 방향의 온도 제어가 더욱 곤란해지는 동시에, 복열 과정에서의 압연 압하율을 크게 해야 하므로, 생산성을 크게 저해한다는 문제가 있다.
- [0014] 또한, 상기 (ii)와 같이 Ni 첨가만으로 원하는 어레스트성을 갖는 강판을 제조하기 위해서는 합금 비용이 너무 듦다는 문제가 있다. 따라서, Ni 첨가량을 삭감하기 위해 Ni 첨가와 조직 미세화 등을 병용하여 어레스트성을 확보하려고 해도 Ni 첨가와 병용하는 다른 인자의 어레스트성에 미치는 영향을 분리·정량화하는 시도는 아직 이루어져 있지 않아, Ni 첨가형 고 어레스트 강판의 제조 지침은 명확화되어 있다고 하기 어려운 상황이다.
- [0015] 또한, 두꺼운 재료에서는, 특허 문헌4에 기재된 발명과 같이 마르텐사이트를 미세하게 분산시키는 것은 곤란하다. 또한, 두꺼운 고강도 강판에 있어서는, 이러한 종류의 취화상은 취성 파괴 발생 특성을 저하시켜버릴 우려가 있다.
- [0016] 또한, 특허 문헌5에 기재된 발명은 두꺼운 재료에 적용하면, 압연 효율이 극단적으로 저하되어버려, 공업적 생산에는 적합하지 않다는 문제가 있다.
- [0017] 이상과 같이, 본 발명이 대상으로 하는, 판 두께가 50  $\mu\text{m}$  이상인 두꺼운 재료이며, 항복 강도가 390 내지 460MPa 급이어도 어레스트성 지표( $T_{\text{Kca}=6000}$ )가 -10°C 이하로 되고, 대형 구조물에 적용 가능한, 고 어레스트 강판을 안정적이면서 효율적으로 제조하는 기술은 아직 확립되어 있지 않다.
- [0018] 본 발명은, 상기 사정을 감안하여 이루어진 것이며, 대형 구조용 강으로서 충분한 어레스트성을 갖고, 게다가 공업적으로 안정적이면서 효율적인 제조가 가능한, 취성 균열 전파 정지 특성이 우수한 두꺼운 고강도 강판 및 그 제조 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.
- [0019] 본 발명은, 상기 과제를 해결할 수 있는 취성 균열 전파 정지 특성이 우수한 두꺼운 고강도 강판 및 그 제조 방법이며, 그 요지로 하는 점은 다음과 같다.
- [0020] [1] 질량%로, C : 0.052 내지 0.14%, Si : 0.03 내지 0.5%, Mn : 0.3 내지 2.0%, P : 0.020% 이하, S : 0.010% 이하, Ni : 0.5 내지 4.0%, Nb : 0.005 내지 0.050%, Ti : 0.005 내지 0.050%, Al : 0.002 내지 0.10%, N : 0.0010 내지 0.0080%를 함유하고, 잔량부 Fe 및 불가피적 불순물로 이루어지며, 또한 하기 수학식 1로 규정되는 Ceq가 0.30 내지 0.50%이며,
- [0021] 체적분율로 하여 60% 이상의 베이나이트를 주체로 하는 마이크로 조직으로서, 또한 펠라이트 분율이 5% 이하이며, 또한 표면으로부터 각각 판 두께의 5% 깊이까지의 표층 영역에 있어서의 마이크로 조직에 대해서는, 원상당 직경이 25  $\mu\text{m}$  초과인 초대 페라이트의 분율이 10% 이하이며, 또한 시멘타이트의 평균 원상당 직경이 0.5  $\mu\text{m}$  이하이며,
- [0022] 판 압연 방향에 수직한 단면을 T 단면으로 하고 상기 T 단면 내의 판면에 평행한 방향을 T 방향으로 할 때, 상기 T 단면 내의 상기 표층 영역을 제외한 내부 영역에 대해, 후방 산란 전자 회절(Electron Back Scattering Pattern: 이하, EBSP라고 한다)을 사용한 결정 방위 해석을 행하여, 상기 T 단면 조직을 결정 방위가 동등한 영역(이하, 등방위 영역이라고 한다)마다로 구분하고, 또한 상기 등방위 영역으로 구분된 T 단면 조직에, JIS G 0551에 준거한 절단법을 적용하여, 상기 T 방향의 임의의 측정선을 긋고, 상기 측정선 상에서 원상당 직경이 8  $\mu\text{m}$  미만인 등방위 영역을 제외하고, 연속하여 이웃하는 복수의 원상당 직경이 8  $\mu\text{m}$  이상인 등방위 영역의 각각 3 개의 <001>축 중에서 T 방향에 가장 가까운 <001>축끼리가 서로 이루는 각도(이하, 균열 전파 편향각이라고 한다)가 20° 미만인, 상기 측정선 상에서 연속하여 이웃하는 복수의 등방위 영역에, 상기 측정선 상에서 상기 원상당 직경이 8  $\mu\text{m}$  이상인 등방위 영역 중 어느 하나에 인접하는 원상당 직경이 8  $\mu\text{m}$  미만인 등방위 영역도 아울러

하나의 영역(이하, 등균열 전파 저항 영역이라고 한다)으로 간주할 때, 상기 등균열 전파 저항 영역의 상기 절단법에 의해 산출되는 평균 원상당 직경(이하, 유효 결정립 직경이라고 한다)이,  $8\mu\text{m}$  이상, 하기 수학식 2의  $d$  ( $\mu\text{m}$ ) 이하인 것을 특징으로 하는, 두께 50mm 이상의 두꺼운 고강도 강판.

### 수학식 1

$$C_{eq} = [C] + [Mn]/6 + ([Cu] + [Ni])/15 + ([Cr] + [Mo] + [V])/5$$

### 수학식 2

$$d = (7.11 \times [Ni] + 11) \times (1.2 - t/300)$$

여기서, [X]는 원소 X의 함유량(질량%), t는 판 두께(mm)를 나타낸다.

[2] 또한, 질량%로, Cu : 0.05 내지 1.5%, Cr : 0.05 내지 1.0%, Mo : 0.05 내지 1.0%, V : 0.005 내지 0.10%, B : 0.0002 내지 0.0030%의 1종 또는 2종 이상을 함유하는 것을 특징으로 하는, 상기 [1]에 기재된 취성 균열 전파 정지 특성이 우수한 두꺼운 고강도 강판.

[3] 또한, 질량%로, Mg : 0.0003 내지 0.0050%, Ca : 0.0005 내지 0.0030%, REM : 0.0005 내지 0.010%의 1종 또는 2종 이상을 함유하는 것을 특징으로 하는, 상기 [1] 또는 [2]에 기재된 취성 균열 전파 정지 특성이 우수한 두꺼운 고강도 강판.

[4] 상기 [1] 내지 [3] 중 어느 한 항에 기재된 조성을 갖는 강판을, 950 내지 1150°C로 가열하고, 900°C 이상의 온도에서 누적 압하율 30% 이상의 조압연을 행한 후, Ar<sub>3</sub> 이상, 하기 수학식 3의 T(°C) 이하의 온도로, 또한 40% 이상의 누적 압하율로 마무리 압연을 행하고, 계속하여 Ar<sub>3</sub> 이상의 온도로부터 판 두께 평균 8°C/s 이상의 냉각 속도로 500°C 이하의 온도까지 가속 냉각을 행하는 것을 특징으로 하는, 취성 균열 전파 정지 특성이 우수한 두꺼운 고강도 강판의 제조 방법.

### 수학식 3

$$T = (37 \times [Ni] + 810) \times (1.1 - t/500)$$

여기서, [Ni]은 Ni 함유량(질량%), t는 판 두께(mm)를 나타낸다.

[5] 상기 가속 냉각 종료 후, 300 내지 600°C의 온도에서 템퍼링 처리하는 것을 특징으로 하는, 상기 [4]에 기재된 취성 균열 전파 정지 특성이 우수한 두꺼운 고강도 강판의 제조 방법.

본 발명의 적용에 의해, 판 두께가 50mm 이상인 두꺼운 재료이며, 항복 강도가 390 내지 460MPa급이어도 어레스트성 지표( $T_{Kca=6000}$ )가 -10°C 이하로 되는, 대형 구조물에 적용 가능한 고 어레스트 강판을, 안정적이면서 효율적인 제조 방법에 의해 제공하는 것이 가능해지는 점에서, 산업상의 효과는 매우 크다.

### 실시예

이하, 본 발명의 실시 형태에 대하여 상세하게 설명한다.

본 발명자들은 베이나이트 주체(체적분율로 하여 60% 이상)의 마이크로 조직을 갖는 강을 대상으로 하여, 항복 강도 390 내지 460MPa급 강의 어레스트성 지배 인자의 실험적 검토를 행하여, 판 두께 50mm 이상의 두꺼운 재료라도 안정되게 어레스트성을 확보할 수 있는 수단을 발견하였다. 본 발명에 있어서의 중요한 포인트는 하기 (1) 내지 (5)의 새로운 견해에 있다.

(1) 취성 균열이 전파할 때의 파괴 단위는 곁보기의 결정립 직경이 아니라, EBSP를 사용한 결정 방위 해석에 의해 얻어지는 입경과 매우 잘 대응한다. 구체적으로는, 압연 방향과 직각인 T 방향에 가장 가까운 <001>축을 일치시키는데 필요한 각도(균열 전파 편향각)가 20° 이상인 입계(원상당 직경이  $8\mu\text{m}$  미만인 입자를 제외한다)로 둘러싸인 입자 중, 등균열 전파 저항 영역의 평균 원상당 직경(유효 결정립 직경)(원상당 직경이  $8\mu\text{m}$  미만의 입자를 포함한다)과 어레스트성의 상관이 양호하다.

(2) Ni는 0.5% 이상 첨가하면 어레스트성 향상 효과가 명백하게 나타난다. Ni의 효과와 미립화의 효과는 독립

적이며, 거의 가산 법칙이 성립된다. 즉 Ni를 첨가한 만큼, 조직은 거칠어도 동등한 어레스트성을 확보할 수 있어, 마무리 압연 온도의 고온화 등의 제조 부하 저감이 가능하다.

[0047] (3) 유효 결정립 직경이 미세해도 펠라이트 분율이 5% 초과로 되면, 조대한 펠라이트가 취성 파괴의 기점으로 되기 쉽고, 어레스트성을 저하되어버린다. 이것을 회피하기 위해서는, 가속 냉각 과정의 냉각 속도, 및 정지 온도를 제어할 필요가 있다.

[0048] (4) 평균 원상당 직경  $0.5\mu\text{m}$  이하의 미세한 시멘타이트는 어레스트성 향상에 기여한다. 시멘타이트의 사이즈를 미세하게 유지하기 위해서는 압연 후의 가속 냉각, 및 계속하여 행하는 열처리 조건을 제어할 필요가 있다.

[0049] (5) 표층부에 생성된 조대한 펠라이트 분율이 10%를 초과하면, 비록 판 두께 평균의 유효 결정립 직경이 미세 하여도 어레스트성은 저하되어버린다. 이것을 피하기 위해서는, 마무리 압연 온도, 냉각 개시 온도가 너무 저 하되지 않도록 제어할 필요가 있다.

[0050] 이하, 본 발명을 구성하는 각 요건에 대하여 상세하게 설명해 간다.

[0051] 일반적으로 베이나이트 강의 인성을 지배하는 기본 조직 단위는 구 오스테나이트 입경이 아니라, 패킷이나 블록으로 불리는 영역[「패킷, 블록」에 대해서는, 비특허 문헌:마츠다, 이노우에, 미무라, 오카무라, 「저합금 조질 고장력 강의 인성과 유효 결정립 직경」, Proc. of Int. sympo. on Toward Improved Ductility and Toughness, Climax Molybdeum Co., Kyoto(1971), p.47 참조]의 사이즈이며, 이 사이즈가 작을수록 인성이 향상 된다.

[0052] 그런데, 통상의 광학 현미경에 의한 조직 관찰로는, 패킷이나 블록의 사이즈를 측정하는 것은 어렵고, 또한 펠라이트가 혼재하는 경우에는 기본 조직 단위를 객관적으로 정의하는 것은 매우 곤란하다.

[0053] 따라서 본 발명자들은 우선 Ni를 함유하지 않는 강편을 사용하여 다양한 조건으로 판 두께 50mm의 강판을 제조하고, 어레스트성 평가를 위해 WES 3003에 기재되는 방법을 바탕으로 500mm의 정사각형 시편에 29mm 깊이의 노치를 가공한 시험편을 사용하여 온도 구배형 ESSO 시험을 행했다. 그 후 시험편의 파면을 주사형 전자 현미경으로 관찰하여, 티어 릿지(tear ridge)라고 하는 연성 파괴부로 둘러싸인 벽개면의 단위(파면 단위)를 측정하여, 이것과 어레스트성 사이에 양호한 상관이 있는 것을 확인했다.

[0054] 다음에, 상기 파면에 수직한 단면에 있어서 EBSP 측정을 행하여, 파면 바로 밑의 입자에 있어서의 결정 방위 해석 결과와 파면 사진을 비교함으로써, 파면 단위 경계가 되는 조건을 상세하게 검토했다. 그 일례를 도 1에 도시한다. EBSP 방위 맵을 바탕으로 등방위 영역 내의 대표점에 대하여 해석을 행하여, 벽개면이라고 생각되는 {100}면으로 구성되는 입방체, 및 균열이 {100} 면을 따라 전파되었다고 가정했을 때에 상정되는 방향을 도 1에 도시했다.

[0055] 도 1 중의 숫자는 가장 가까운 <001>축을 일치시키는데 필요해지는 각도(균열 전파 편향 각도)이며, T 방향에 수직한 {100}면의 회전을 허용하여 정렬시키기 위하여 필요한 각도이다. 이것으로부터, 균열 전파 방향이 명확하게 변화하는 것은 (a), (b), (c), (f)와 같이, 균열 전파 편향각이  $20^\circ$  이상인 경우이며, 파면 관찰 결과로부터 실제로 파면 단위 경계로 되어 있는 것이 확인되었다. 단, 각도가  $20^\circ$  이상이어도 (d)로부터 (e)와 같이 사이즈가 작은 영역에서는 전파 방향을 바꾸지 않는 경우가 있다. 이것은, 균열의 발생이나 부분적으로 존재하는 연성 파면에 대응하는 것으로 추정된다. 이와 같은 예는, 원상당 직경으로  $8\mu\text{m}$  미만의 영역에서 보여지고, 파면 관찰에서도 명확한 경계를 이루고 있지 않은 것이 확인되었다. 유효 결정립 직경을 구할 때에  $8\mu\text{m}$  미만의 영역이 존재할 경우에는 인접하는 어느 한 영역과 합체시켜, 그 양측의 영역끼리의 편향각을 조사하여 등균열 전파 저항 영역의 경계를 결정하면 된다. 이상과 같이, EBSP 해석 결과로부터,  $8\mu\text{m}$  미만의 입자를 제외하고, 균열 전파 편향각이  $20^\circ$  이상인 경계를 결정하여, 이 경계로 둘러싸인 영역의 평균 원상당 직경을 산출하면, 유효 결정립 직경을 추정할 수 있다.

[0056] 이렇게 하여 측정한 유효 결정립 직경과 어레스트성의 관계를 상세하게 조사한 바, 대형 구조용 강에 적용 가능한 레벨의 어레스트성을 부여하기 위해서는 마무리 압연을  $800^\circ\text{C}$  이하의 저온에서 실시할 필요가 있는 한편, 항복 강도를 390MPa 이상으로 하기 위해서는 냉각 개시 온도를 확보할 필요가 있어, 효율적이면서 안정적으로 제조하는 것은 매우 어려운 것이 판명되었다.

[0057] 따라서 상기 과제를 해결하는 수단으로서, Ni 첨가에 의한 효과를 상세하게 검토했다. 마이크로 조직, 강도가 거의 동등해지도록 Ni, Mn의 벨런스를 다양하게 바꾸어 주조한 강편을 사용하여, 동일한 제조 조건으로 판 두께 50mm, 및 80mm의 강판을 제조하고, ESSO 시험에 의해 어레스트성을 조사했다. 그 결과, 유효 결정립 직경에는

거의 변화가 보이지 않음에도 불구하고 Ni양이 많을수록 어레스트성이 향상되는 경향을 확인하였다. 이 모습을 도 2에 도시한다.

[0058] 여기에서는, 쥐성 균열 전파 정지 특성  $K_{ca}=6000\text{N/mm}^{1.5}$ 로 되는 온도( $T_{Kca=6000}$ )에서 어레스트성을 평가했다. 도 2로부터 Ni양이 0.5% 이상으로 되면 명백하게 어레스트성이 향상되는 것을 알았다. ESSO 시험편의 과면을 관찰하면, Ni양 증가에 수반하여 3차원적인 요철이 현저해지는 모습이 확인되었다. 이것은 고용 Ni에 의해 교차 슬립이 조장되어 균열의 진전 방향이 보다 랜덤화되었기 때문으로 생각된다.

[0059] 다음에, Ni 첨가와 유효 결정립 직경 미세화의 효과를 분리·정량화하는 것을 목적으로, 상기한 Ni 함유 강편을 다양한 조건으로 압연한 강판의 어레스트성을 조사했다. 그 결과, 미립화에 의한 어레스트성 향상 효과는 Ni양에 의존하지 않고, 거의 가산 가능한 것을 발견했다. 이 모습을 도 3에 도시한다. 즉, 적당량의 Ni를 활용함으로써 유효 결정립 직경을 미세화하지 않더라도 어레스트성을 확보할 수 있다. 따라서, Ni 합금 비용보다도 강재 제조 효율이 요구되는 경우에는 Ni 첨가에 의해 마무리 압연 온도를 고온화할 수 있어, 온도 대기 시간이 단축되기 때문에, 두꺼운 재료의 생산성을 현저하게 높이는 것이 가능해진다.

[0060] 본 발명자들은 유효 결정립 직경 이외의 조직 인자가 어레스트성에 미치는 영향에 관해서도 검토했다. 이것은, 유효 결정립 직경이 미세함에도 불구하고 어레스트성이 충분하지 않은 경우가 확인되었기 때문이다.

[0061] 그 하나가 베이나이트 주체의 조직에 혼재하는 펠라이트이다. 펠라이트 조직의 분율이 높아지면, 큰 펠라이트가 증가되어 이것이 쥐성 파괴의 기점으로 됨으로써, 어레스트성도 열화되는 경향이 있다. 그로 인해, 도 4에 도시된 바와 같이, 펠라이트 분율은 5% 이하로 할 필요가 있다.

[0062] 또한, 특히 베이나이트 중에 포함되는 시멘타이트의 사이즈도 어레스트성에 영향을 주는 것을 확인하였다. 도 5에 도시된 바와 같이, 시멘타이트의 평균 원상당 직경이  $0.5\mu\text{m}$  초과이면 어레스트성은 저하되어버린다. 이것은, 미세한 시멘타이트는 주 균열 전파에 앞서, 매트릭스와의 계면에서 마이크로 크랙을 생성시켜 균열 선단에서의 응력 상태를 완화시키기 때문에 추정된다. 한편, 시멘타이트가 조대화되면 펠라이트와 마찬가지로 쥐성 파괴를 유발하는 요인으로 되어, 어레스트성도 저하되어버린다.

[0063] 또한, 표층부에 생성된 조대한 페라이트도 어레스트성을 저하시키는 것이 판명되었다. 이 표층 조대 페라이트는 비교적 켄칭성이 낮은 강을  $\text{Ar}_3$ 보다 낮은 온도로 압연하거나 또는  $\text{Ar}_3$  이상에서 압연을 완료해도 가속 냉각의 개시가  $\text{Ar}_3$ 을 하회한 경우에 생성되고 도 6에 도시된 바와 같이 표리면으로부터 판 두께의 5%의 영역에 있어서의 원상당 직경  $25\mu\text{m}$  초과의 페라이트의 분율이 10% 이하이면, 현저한 어레스트성 저하는 회피할 수 있다.

[0064] 이상과 같은 조직 인자를 고려하면서, 두꺼운 고강도 고 어레스트 강판의 제조 지침을 명확화하기 위해, 상기한 펠라이트, 시멘타이트, 표층 페라이트에 관한 조건을 만족하는 강판을 사용하여, 어레스트성에 미치는 유효 결정립 직경, Ni양, 판 두께의 영향을 더욱 상세하게 해석했다. 그 결과, 유효 결정립 직경의 조건으로서 하기 d 이하가 필요한 것을 발견했다.

$$d = (7.11 \times [\text{Ni} \%] + 11) \times (1.2 - t/300)$$

[0066] 여기서,  $[\text{Ni}]$ 는 Ni 함유량(질량%), t는 판 두께( $\text{mm}$ )를 나타낸다.

[0067] 상기 d는 판 두께 50mm재의 어레스트성에 미치는 유효 결정립 직경과 Ni의 영향을 베이스로 하여 도 7로부터 유도한 1차식과, Ni : 2%를 함유하는 판 두께 80mm재의 표리면을 연삭하여 판 두께를 변화시켰을 때의 시험 결과에 기초하여, 도 8로부터 유도한 판 두께 효과의 식을 조합한 것이다. 유효 결정립 직경이 상기 d보다도 큰 경우에는 쥐성 균열이 어느 한 입자로부터 다른 입자로 전파될 때에 형성되는 티어 릿지의 빈도가 충분하지 않기 때문에, 균열 전파를 억제하는 효과가 작아져, 어레스트성이 저하된다.

[0068] 계속하여 본 발명에 있어서의 제조 조건의 한정 이유에 대하여 설명한다.

[0069] 본 발명에서는 강편의 가열 온도를 950 내지 1150°C로 했다. 재가열 온도가 950°C 미만에서는 합금 원소의 용체화가 불충분하여 재질 불균일의 원인으로 되고, 1150°C를 초과하면 가열 오스테나이트 입경이 조대화되어버려 최종적인 조직 미세화가 곤란해질 우려가 있다.

[0070] 다음의 조압연은 900°C 이상의 온도, 30% 이상의 누적 압하율로 행할 필요가 있다. 이러한 조건을 만족하지 않으면 오스테나이트 입자의 재결정이 충분히 진행되지 않아 혼립 조직으로 되어, 재질 불균일의 원인으로 될 수 있다.

- [0071] 계속하여 행하는 마무리 압연은, 어레스트성을 지배하는 유효 결정립 직경 미세화의 관점에서 가장 중요한 공정이며,  $Ar_3$ (냉각 시, 오스테나이트로부터 페라이트의 석출이 개시하는 온도) 이상, 하기  $T(^{\circ}\text{C})$  이하의 온도, 또한 40% 이상의 누적 압하율로 실시한다.
- [0072]  $T=(37 \times [\text{Ni}]+810) \times (1.1-t/500)$
- [0073] 여기서,  $[\text{Ni}]$ 는 Ni 함유량(질량%),  $t$ 는 판 두께( $\text{mm}$ )를 나타낸다.
- [0074] 상기  $T$ 는 전술한 실험 결과에 기초하여  $T_{\text{Kca}=6000} \leq -10^{\circ}\text{C}$ 를 만족시키기 위해 필요한 Ni양과 마무리 압연 온도의 관계를 나타내는 도 9로부터 구한 1차식과, Ni를 2% 함유하는 강편을 사용하여 판 두께와 마무리 압연 온도를 다양하게 변화시켰을 때의 시험 결과에 기초하여 도 10으로부터 유도한 판 두께 효과의 식을 조합한 것이다. 온도가  $Ar_3$  미만이면 표층부에 원상당 직경  $25\mu\text{m}$  초과의 조대한 가공 페라이트가 생성되어, 어레스트성, 강도, 인성, 연성이 저하되어버린다. 한편, 온도가 상기  $T$ 를 초과하거나 또는 누적 압하율이 40% 미만이면, 유효 결정립 직경이 충분히 미세화되지 않기 때문에, 어레스트성이 저하되어버린다. 첨가 Ni양에 따라서 상기  $T$ 보다도 약간 낮은 온도를 선택함으로써 마무리 압연 전의 온도 대기 시간이 저감되어, 두꺼운 고강도 강판을 효율적으로 제조하는 것이 가능해진다.
- [0075] 마무리 압연 완료 후에는  $Ar_3$  이상의 온도로부터, 판 두께 평균으로  $8^{\circ}\text{C}/\text{s}$  이상의 냉각 속도로  $500^{\circ}\text{C}$  이하의 온도까지 가속 냉각을 행한다. 냉각 개시 온도가  $Ar_3$  미만이면 표층부의 조대 페라이트 분율이 10% 초과로 되어, 어레스트성이 저하되어버린다. 냉각 속도가  $8^{\circ}\text{C}/\text{s}$  미만, 혹은 냉각 정지 온도가  $500^{\circ}\text{C}$ 보다도 높으면, 강도가 부족할 뿐만 아니라, 유효 결정립 직경의 미세화가 불충분해지는 동시에, 어레스트 향상에 기여하는 시멘타이트가 조대화, 혹은 펠라이트가 5% 초과 생성되어, 어레스트성이 저하되어버린다.
- [0076] 가속 냉각 후에는, 강도 · 인성을 조정하기 위하여 300 내지  $600^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 텁퍼링 처리를 행해도 된다. 텁퍼링 처리 온도가  $300^{\circ}\text{C}$  미만에서는 연성이나 인성의 개선이 충분하지 않고,  $600^{\circ}\text{C}$ 를 초과하면 시멘타이트가 조대화되어버려 어레스트성이 저하되어버린다.
- [0077] 다음에, 본 발명의 성분 한정 이유에 대하여 설명한다.
- [0078] C(탄소)는 시멘타이트 생성, 조직 조대화 방지에 기여하는 원소인 동시에, 저렴하게 강도를 높이는데 불가결한 원소이기 때문에 0.01% 이상 첨가한다. 한편, 첨가량이 증가되면 대입열 HAZ(Heat Affected Zone) 인성 확보가 곤란해져 시멘타이트도 조대화되기 쉬워지기 때문에 0.14%를 상한으로 한다.
- [0079] Si(실리콘)은 저렴한 탈산 원소로서 매트릭스를 고용강화하기 때문에 0.03% 이상 첨가하지만, 0.5%를 초과하면 용접성과 HAZ 인성을 열화시키기 때문에 상한을 0.5%로 한다.
- [0080] Mn(망간)은 모재의 강도 · 인성을 향상시키는 원소로서 유효하기 때문에 0.3% 이상 첨가하지만, 과잉 첨가는 HAZ 인성, 용접 균열성을 열화시키기 때문에 2.0%를 상한으로 한다.
- [0081] P(인), S(유황)은 함유량이 적을수록 바람직하지만, 이것을 공업적으로 저감시키기 위해서는 염청난 비용이 드는 점에서, P는 0.02%, S는 0.01%를 상한으로 한다.
- [0082] Ni(니켈)은 강도 확보와 어레스트성, HAZ 인성 향상에 유효하기 때문에 0.5% 이상 첨가하지만, Ni 양의 증가는 강편 비용을 상승시키기 때문에 4.0% 이하로 제한한다.
- [0083] Nb(니오브)는 미량의 첨가에 의해 조직 미세화, 변태 강화, 석출 강화에 기여하며 모재 강도 확보에 유효한 원소이기 때문에 0.005% 이상 첨가하지만, 과잉으로 첨가하면 HAZ를 경화시켜 현저하게 인성을 열화시키기 때문에 0.050%를 상한으로 한다.
- [0084] Ti(티탄)은, 미량의 첨가에 의해 조직 미세화, 석출 강화, 미세 TiN 생성에 의해 모재의 강도 · 인성, HAZ 인성 향상에 유효하기 때문에 0.005% 이상 첨가하지만, 과잉으로 첨가하면 HAZ 인성을 현저하게 열화시키기 때문에 0.050%를 상한으로 한다.
- [0085] Al(알루미늄)은, 중요한 탈산 원소이기 때문에 0.002% 이상 첨가하지만, 과잉으로 첨가하면 강편의 표면 품위를 손상시키고, 인성에 유해한 개재물을 형성하기 때문에 0.10%를 상한으로 한다.
- [0086] N(질소)는 Ti와 함께 질화물을 형성하여 HAZ 인성을 향상시키기 때문에 0.0010% 이상 첨가하지만, 과잉으로 첨가하면 고용 N에 의한 취화가 발생하기 때문에 0.0080% 이하로 한정한다.

- [0087] 선택 첨가 원소는 이하의 이유에 의해 한정한다.
- [0088] Cu(구리), Cr(크롬), Mo(몰리브덴)은 모두 펜칭성을 향상시키고, 고강도화에 유효하기 때문에, 0.05% 이상 첨가한다. 한편, 과도한 첨가는 HAZ 인성을 저하시키기 때문에 Cu는 1.5% 이하, Cr 및 Mo는 1.0% 이하로 제한한다.
- [0089] V(바나듐)는 석출 강화에 의해 강도 상승에 기여하기 때문에 0.005% 이상 첨가하지만, 0.10% 초과하여 첨가하면 HAZ 인성을 저하시키기 때문에 이것을 상한으로 한다.
- [0090] B(붕소)는 펜칭성을 향상시키는 원소로서, 적당량을 첨가함으로써 강의 강도를 높이는데 유효하지만, 과도한 첨가는 용접성을 손상시키기 때문에 0.0002 내지 0.0030%로 제한한다.
- [0091] Mg(마그네슘), Ca(칼슘), REM은 미세한 산화물이나 황화물을 형성하여 HAZ 인성 향상에 기여하지만, 과도한 첨가는 개재물을 조대화시키는 인성을 저하시키기 때문에 Mg은 0.0003 내지 0.0050%, Ca는 0.0005 내지 0.0030%, REM은 0.0005 내지 0.010%의 범위로 제한한다. 또한, REM은 La, Ce 등의 희토류 원소를 의미한다.
- [0092] 또한, 모재 강도와 조인트 특성을 양립시키기 위해, 하기 식으로 나타내는  $C_{eq}$ 를 0.30 내지 0.50%의 범위로 제한할 필요가 있다.  $C_{eq}$ 가 0.30% 미만이면, 판 두께 50mm 이상의 두꺼운 재료의 모재 항복 강도를 390MPa 이상 확보하는 것이 곤란하고, 0.50% 초과이면 용접성, 조인트 인성을 확보하는 것이 곤란해지는 데다가, 강도가 너무 높아져 어레스트성까지 저하될 가능성이 있다.
- [0093]  $C_{eq} = [C] + [Mn]/6 + ([Cu] + [Ni])/15$
- [0094]  $+ ([Cr] + [Mo] + [V])/5$
- [0095] 여기서, [원소 기호]는 원소의 함유량(질량%)을 나타낸다. 즉, 원소 기호를 X로 하면, [X]는 원소 X의 함유량(질량%)을 나타낸다.
- [0096] 실시예
- [0097] 이하, 실시예에 의해 본 발명의 효과를 보다 명백한 것으로 한다. 또한, 본 발명은, 이하의 실시예에 한정되는 것이 아니라, 그 요지를 변경하지 않는 범위에서 적절하게 변경하여 실시할 수 있다.
- [0098] 표 1의 화학 성분을 갖는 강편을 사용하여, 표 2, 표 3의 제조 조건에 의해 판 두께 50 내지 80mm의 강판을 시작(試作)했다. 표 4, 표 5에 조직, 모재 강도, 어레스트성을 나타낸다.
- [0099] 표층 조대 페라이트 분율(표층 조대 a 분율)은, 강판 최표층부의 T 단면의 광학 현미경 사진으로부터, 화상 해석에 의해 측정하였다.
- [0100] 펠라이트 분율은, 강판의 표면하 5mm, 판 두께의 1/4 상당부, 판 두께 중심부의 T 단면의 광학 현미경 사진으로부터 측정했다.
- [0101] 시멘타이트 입경( $\Theta$  입경)은, 상기와 마찬가지의 판 두께 위치 3개소로부터 추출 레플리카를 제작하고, 투과 전자 현미경을 사용하여 촬영한 사진으로부터 평균 원상당 직경을 산출하였다.
- [0102] 유효 결정립 직경은, 상기와 마찬가지의 판 두께 위치 3개소로부터 T 단면이 측정면으로 되도록 EBSP용 샘플을 채취하여  $500 \times 500 \mu\text{m}$ 의 영역을  $1 \mu\text{m}$  피치로 측정한 후, 결정 방위 맵을 바탕으로 3 내지  $5 \mu\text{m}$  피치로 총 길이 2mm의 범위에 걸쳐 방위 해석을 행함으로써 입계를 결정하여, JIS G 0551에 준거한 절단법에 의해 산출했다.
- [0103] 항복 강도(YP), 인장 강도(TS)에 대해서는 판 두께 중심부로부터 T 방향으로 채취한 JIS Z 2201의 4호 인장 시험편을 사용하여 평가하였다.
- [0104] 어레스트성은, 온도 구배형 ESSO 시험을 행하여  $K_{ca} = 6000 \text{ N/mm}^{1.5}$ 을 나타내는 온도에서 평가했다.

표 1

| 표 | C     | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Nb    | Ti    | Al    | N      | Cu   | Cr   | Mo    | V      | B      | Mg     | Ca     | REM    | Ceq  |
|---|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--------|------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|   |       |      |      |       |       |      |       |       |       |        |      |      |       |        |        |        |        |        |      |
|   |       |      |      |       |       |      |       |       |       |        |      |      |       |        |        |        |        |        |      |
| A | 0.033 | 0.22 | 1.42 | 0.013 | 0.003 | 0.56 | 0.036 | 0.018 | 0.026 | 0.0037 | —    | —    | —     | —      | —      | —      | 0.0016 | —      | 0.31 |
| B | 0.090 | 0.15 | 0.72 | 0.005 | 0.003 | 1.80 | 0.007 | 0.015 | 0.025 | 0.0041 | —    | —    | —     | 0.0011 | —      | —      | —      | —      | 0.33 |
| C | 0.072 | 0.36 | 1.03 | 0.006 | 0.004 | 1.22 | 0.011 | 0.007 | 0.011 | 0.0021 | 0.28 | 0.18 | —     | —      | —      | —      | —      | —      | 0.38 |
| D | 0.061 | 0.24 | 0.56 | 0.008 | 0.002 | 3.54 | 0.006 | 0.009 | 0.022 | 0.0031 | —    | —    | —     | —      | —      | —      | —      | —      | —    |
| E | 0.080 | 0.45 | 1.00 | 0.007 | 0.003 | 1.41 | 0.018 | 0.022 | 0.075 | 0.0054 | 0.45 | —    | —     | 0.044  | —      | —      | —      | —      | 0.39 |
| F | 0.110 | 0.33 | 0.65 | 0.009 | 0.002 | 1.98 | 0.009 | 0.013 | 0.030 | 0.0038 | —    | —    | 0.56  | —      | —      | —      | —      | —      | 0.38 |
| G | 0.077 | 0.20 | 1.50 | 0.004 | 0.002 | 1.16 | 0.013 | 0.009 | 0.039 | 0.0018 | —    | —    | —     | —      | 0.0015 | —      | —      | 0.0041 | 0.46 |
| H | 0.080 | 0.18 | 1.03 | 0.006 | 0.004 | 1.56 | 0.011 | 0.010 | 0.006 | 0.0041 | —    | 0.72 | —     | —      | —      | 0.0023 | —      | —      | 0.50 |
| I | 0.014 | 0.14 | 1.71 | 0.010 | 0.003 | 0.75 | 0.014 | 0.042 | 0.019 | 0.0035 | 1.39 | —    | —     | 0.066  | 0.0025 | —      | —      | —      | 0.45 |
| J | 0.132 | 0.23 | 0.79 | 0.008 | 0.002 | 0.97 | 0.009 | 0.008 | 0.028 | 0.0036 | —    | —    | —     | —      | —      | 0.0018 | 0.0012 | —      | 0.33 |
| K | 0.083 | 0.27 | 1.44 | 0.006 | 0.002 | 0.63 | 0.005 | 0.009 | 0.020 | 0.0027 | —    | —    | —     | —      | —      | —      | —      | —      | 0.37 |
| L | 0.093 | 0.08 | 1.37 | 0.007 | 0.005 | 1.11 | 0.012 | 0.012 | 0.015 | 0.0030 | 0.84 | —    | —     | —      | —      | —      | —      | —      | 0.45 |
| M | 0.058 | 0.04 | 1.05 | 0.005 | 0.002 | 1.46 | 0.017 | 0.018 | 0.024 | 0.0031 | —    | 0.68 | —     | —      | —      | —      | —      | —      | 0.47 |
| N | 0.083 | 0.16 | 1.16 | 0.004 | 0.003 | 1.37 | 0.025 | 0.020 | 0.038 | 0.0071 | —    | —    | 0.059 | —      | —      | —      | —      | —      | 0.39 |
| O | 0.052 | 0.25 | 1.20 | 0.006 | 0.004 | 2.88 | 0.011 | 0.011 | 0.029 | 0.0046 | —    | —    | —     | —      | —      | 0.0030 | —      | —      | 0.44 |
| P | 0.030 | 0.30 | 0.97 | 0.012 | 0.008 | 2.35 | 0.020 | 0.007 | 0.012 | 0.0022 | —    | —    | —     | —      | —      | —      | 0.0028 | 0.35   |      |
| Q | 0.060 | 0.12 | 1.02 | 0.008 | 0.001 | 0.52 | 0.008 | 0.014 | 0.032 | 0.0025 | —    | 0.50 | 0.34  | —      | —      | 0.0009 | —      | 0.43   |      |
| R | 0.146 | 0.34 | 0.92 | 0.003 | 0.003 | 1.20 | 0.010 | 0.008 | 0.018 | 0.0026 | —    | —    | —     | —      | —      | —      | —      | 0.38   |      |
| S | 0.099 | 0.45 | 0.98 | 0.010 | 0.009 | 0.30 | 0.015 | 0.020 | 0.072 | 0.0050 | 0.44 | 0.14 | 0.15  | 0.050  | —      | —      | —      | 0.38   |      |
| T | 0.071 | 0.30 | 1.76 | 0.017 | 0.008 | 2.38 | 0.020 | 0.008 | 0.014 | 0.0025 | —    | —    | —     | —      | —      | 0.0070 | 0.52   |        |      |

밑줄은 본 발명의 범위 밖

표 2

| 구분 | 번호 | 강   | 슬래브 두께 (mm) | 판 두께 (mm) | 기열   | 조합연        |            |            | 마무리 합연     |            |     | 가속냉각       |              |              | 열처리 온도 (°C) |     |
|----|----|-----|-------------|-----------|------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|------------|--------------|--------------|-------------|-----|
|    |    |     |             |           |      | 개시 온도 (°C) | 종료 온도 (°C) | 누적 압하율 (%) | 개시 온도 (°C) | 종료 온도 (°C) | T   | 누적 압하율 (%) | 냉각 속도 (°C/s) | 개시 온도 (°C/s) | 정지 온도 (°C)  |     |
| 1  | A  | 180 | 60          | 1135      | 1009 | 992        | 31         | 805        | 778        | 774        | 814 | 52         | 16           | 748          | 458         | -   |
| 2  | B  | 240 | 65          | 1058      | 980  | 964        | 33         | 825        | 803        | 745        | 850 | 59         | 15           | 786          | 306         | -   |
| 3  | B  | 220 | 55          | 1072      | 1005 | 978        | 48         | 850        | 829        | 742        | 868 | 52         | 10           | 799          | 475         | -   |
| 4  | C  | 280 | 70          | 1050      | 983  | 966        | 43         | 810        | 792        | 752        | 821 | 56         | 12           | 770          | 213         | 550 |
| 5  | D  | 300 | 80          | 997       | 921  | 902        | 39         | 860        | 841        | 677        | 885 | 57         | 9            | 822          | 255         | -   |
| 6  | E  | 220 | 50          | 1088      | 1011 | 985        | 49         | 833        | 806        | 733        | 862 | 55         | 12           | 788          | 280         | -   |
| 7  | E  | 220 | 60          | 1065      | 998  | 975        | 41         | 825        | 801        | 737        | 845 | 54         | 11           | 785          | 116         | 395 |
| 8  | F  | 200 | 65          | 1026      | 960  | 932        | 40         | 819        | 798        | 690        | 857 | 46         | 15           | 784          | 141         | 485 |
| 9  | F  | 250 | 75          | 1020      | 954  | 927        | 40         | 815        | 792        | 694        | 839 | 50         | 9            | 778          | 184         | -   |
| 10 | G  | 250 | 70          | 1120      | 1014 | 987        | 38         | 798        | 775        | 724        | 819 | 55         | 13           | 760          | 239         | -   |
| 11 | H  | 300 | 80          | 1075      | 1009 | 984        | 40         | 791        | 773        | 731        | 816 | 56         | 9            | 761          | 275         | -   |
| 12 | H  | 250 | 60          | 1070      | 1010 | 981        | 58         | 810        | 792        | 724        | 850 | 43         | 12           | 775          | 306         | -   |
| 13 | I  | 250 | 60          | 1056      | 984  | 962        | 40         | 805        | 784        | 718        | 821 | 60         | 8            | 765          | 425         | 586 |
| 14 | I  | 220 | 50          | 1055      | 986  | 960        | 50         | 820        | 797        | 715        | 838 | 55         | 14           | 773          | 384         | -   |
| 15 | J  | 200 | 55          | 1090      | 1093 | 981        | 45         | 815        | 795        | 769        | 837 | 50         | 12           | 776          | 269         | -   |
| 16 | K  | 200 | 60          | 1010      | 970  | 948        | 40         | 800        | 782        | 753        | 817 | 50         | 11           | 765          | 346         | -   |
| 17 | L  | 220 | 70          | 1076      | 996  | 970        | 36         | 805        | 786        | 715        | 817 | 50         | 10           | 770          | 280         | -   |
| 18 | M  | 280 | 80          | 1095      | 1013 | 988        | 38         | 800        | 781        | 743        | 812 | 54         | 8            | 769          | 135         | 523 |
| 19 | N  | 220 | 65          | 1141      | 1057 | 1020       | 34         | 822        | 803        | 736        | 835 | 55         | 10           | 788          | 304         | -   |
| 20 | O  | 250 | 75          | 970       | 926  | 907        | 44         | 845        | 824        | 663        | 871 | 46         | 9            | 807          | 286         | -   |
| 21 | P  | 200 | 50          | 1122      | 1024 | 1001       | 53         | 880        | 860        | 798        | 897 | 47         | 16           | 842          | 401         | -   |
| 22 | Q  | 200 | 60          | 1020      | 965  | 934        | 45         | 810        | 789        | 765        | 813 | 45         | 12           | 773          | 346         | 500 |

$$T = (37 \times [Ni] + 810) \times (1.1 - t/500)$$

표 3

| 구분 | 번호 | 판<br>크기<br>(mm) | 판<br>두께<br>(mm) | 기열               |                  | 조업연              |                  | 마무리 압연    |                  | 기속 냉각              |                  | 열처리<br>온도<br>(°C) |    |     |     |     |     |
|----|----|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|------------------|--------------------|------------------|-------------------|----|-----|-----|-----|-----|
|    |    |                 |                 | 개시<br>온도<br>(°C) | 종료<br>온도<br>(°C) | 개시<br>온도<br>(°C) | 누적<br>압하율<br>(%) | T<br>(°C) | 누적<br>압하율<br>(%) | 냉각<br>속도<br>(°C/s) | 개시<br>온도<br>(°C) | 정지<br>온도<br>(°C)  |    |     |     |     |     |
|    | 23 | A               | 180             | 60               | 1135             | 1006             | 990              | 31        | 782              | 758                | 774              | 814               | 52 | 15  | 739 | 467 | -   |
|    | 24 | B               | 240             | 65               | 1060             | 983              | 965              | 33        | 827              | 804                | 745              | 850               | 59 | 5   | 788 | 303 | -   |
|    | 25 | B               | 220             | 55               | 1071             | 1005             | 980              | 48        | 891              | 870                | 742              | 868               | 52 | 10  | 826 | 480 | -   |
|    | 26 | C               | 280             | 70               | 1055             | 987              | 962              | 43        | 812              | 793                | 752              | 821               | 56 | 12  | 772 | 218 | 635 |
|    | 27 | D               | 300             | 80               | 986              | 918              | 901              | 56        | 860              | 840                | 677              | 885               | 36 | 9   | 821 | 263 | -   |
|    | 28 | E               | 220             | 50               | 1090             | 1012             | 982              | 49        | 835              | 807                | 753              | 882               | 55 | 12  | 705 | 251 | -   |
|    | 29 | E               | 220             | 60               | 1164             | 988              | 977              | 41        | 825              | 802                | 737              | 845               | 54 | 11  | 785 | 110 | 395 |
|    | 30 | F               | 200             | 65               | 1025             | 959              | 930              | 40        | 875              | 847                | 690              | 857               | 46 | 15  | 825 | 192 | 487 |
|    | 31 | F               | 200             | 75               | 1020             | 955              | 927              | 25        | 815              | 790                | 694              | 839               | 50 | 9   | 778 | 182 | -   |
|    | 32 | G               | 210             | 70               | 1186             | 1071             | 1036             | 26        | 795              | 772                | 724              | 819               | 55 | 13  | 758 | 235 | -   |
|    | 33 | H               | 300             | 80               | 1075             | 1005             | 981              | 40        | 790              | 772                | 731              | 816               | 56 | 9   | 763 | 528 | -   |
| 외  | 34 | I               | 250             | 60               | 1055             | 985              | 960              | 40        | 805              | 786                | 718              | 821               | 60 | 0.5 | -   | -   | -   |
|    | 35 | J               | 200             | 55               | 1093             | 1002             | 979              | 58        | 815              | 794                | 769              | 837               | 35 | 12  | 777 | 258 | -   |
|    | 36 | K               | 200             | 60               | 1010             | 970              | 948              | 40        | 840              | 822                | 753              | 817               | 50 | 11  | 805 | 375 | -   |
|    | 37 | L               | 220             | 70               | 1076             | 987              | 972              | 36        | 805              | 786                | 715              | 817               | 50 | 4   | 771 | 276 | -   |
|    | 38 | M               | 280             | 80               | 1097             | 1013             | 990              | 38        | 800              | 780                | 745              | 812               | 54 | 8   | 769 | 138 | 620 |
|    | 39 | N               | 200             | 65               | 1141             | 1056             | 1018             | 28        | 820              | 801                | 736              | 835               | 55 | 10  | 788 | 303 | -   |
|    | 40 | O               | 250             | 75               | 973              | 929              | 908              | 44        | 845              | 825                | 663              | 871               | 46 | 9   | 808 | 543 | -   |
|    | 41 | P               | 200             | 50               | 1122             | 1024             | 1001             | 53        | 705              | 693                | 709              | 897               | 47 | 16  | 680 | 395 | -   |
|    | 42 | Q               | 200             | 60               | 1020             | 985              | 934              | 45        | 810              | 790                | 765              | 813               | 45 | 12  | 741 | 334 | 503 |
|    | 43 | R               | 280             | 70               | 1050             | 985              | 966              | 43        | 810              | 794                | 747              | 820               | 56 | 12  | 768 | 220 | 575 |
|    | 44 | S               | 220             | 50               | 1085             | 1012             | 983              | 48        | 804              | 780                | 776              | 821               | 55 | 13  | 759 | 286 | -   |
|    | 45 | T               | 200             | 50               | 1120             | 1029             | 1005             | 53        | 878              | 860                | 631              | 888               | 47 | 15  | 844 | 405 | -   |

$T = (37 \times [Ni] + 810) \times (1 - 1/\sqrt{500})$   
결출은 냉卻의 범위

표 4

| 구분 | 번호 | 강판 두께<br>(mm) | 조적                 |                   |                      |                                 |                                     |                        | 모재 강도       | 이레스트성<br>$T_{K\alpha=4000}$<br>(°C) |     |
|----|----|---------------|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------|-------------------------------------|-----|
|    |    |               | 비이나이트<br>분율<br>(%) | 풀라이트<br>분율<br>(%) | 표층 조대<br>α 분율<br>(%) | 평균 θ<br>입경<br>( $\mu\text{m}$ ) | 평균 유효<br>결정 크기<br>( $\mu\text{m}$ ) | d<br>( $\mu\text{m}$ ) | YP<br>(MPa) | TS<br>(MPa)                         |     |
| 1  | A  | 60            | 63                 | 1.5               | 5.3                  | 0.24                            | 14                                  | 15                     | 443         | 566                                 | -24 |
| 2  | B  | 65            | 73                 | 3.0               | 1.8                  | 0.37                            | 21                                  | 23                     | 450         | 568                                 | -21 |
| 3  | B  | 55            | 75                 | 3.4               | 1.4                  | 0.39                            | 23                                  | 24                     | 467         | 577                                 | -28 |
| 4  | C  | 70            | 74                 | 2.3               | 1.2                  | 0.40                            | 17                                  | 19                     | 462         | 550                                 | -20 |
| 5  | D  | 80            | 72                 | 1.0               | 0.8                  | 0.17                            | 31                                  | 34                     | 426         | 539                                 | -23 |
| 6  | E  | 50            | 80                 | 2.2               | 2.5                  | 0.28                            | 20                                  | 22                     | 485         | 605                                 | -36 |
| 7  | E  | 60            | 79                 | 2.5               | 3.0                  | 0.30                            | 20                                  | 21                     | 512         | 602                                 | -32 |
| 8  | F  | 65            | 76                 | 3.4               | 1.3                  | 0.32                            | 23                                  | 25                     | 488         | 584                                 | -30 |
| 9  | F  | 75            | 79                 | 4.1               | 2.2                  | 0.36                            | 23                                  | 24                     | 483         | 601                                 | -28 |
| 10 | G  | 70            | 87                 | 0.9               | 2.3                  | 0.28                            | 18                                  | 19                     | 474         | 580                                 | -23 |
| 11 | H  | 80            | 89                 | 1.6               | 1.6                  | 0.39                            | 20                                  | 21                     | 469         | 570                                 | -21 |
| 12 | H  | 60            | 92                 | 1.4               | 1.1                  | 0.31                            | 20                                  | 22                     | 478         | 593                                 | -24 |
| 13 | I  | 60            | 90                 | 0.2               | 8.4                  | 0.10                            | 15                                  | 16                     | 502         | 604                                 | -22 |
| 14 | I  | 50            | 95                 | 0.1               | 7.2                  | 0.08                            | 16                                  | 17                     | 519         | 626                                 | -27 |
| 15 | J  | 55            | 71                 | 2.5               | 1.3                  | 0.37                            | 16                                  | 18                     | 469         | 561                                 | -25 |
| 16 | K  | 60            | 75                 | 2.0               | 4.4                  | 0.30                            | 14                                  | 15                     | 458         | 573                                 | -24 |
| 17 | L  | 70            | 86                 | 2.3               | 2.8                  | 0.35                            | 16                                  | 18                     | 490         | 620                                 | -20 |
| 18 | M  | 80            | 84                 | 1.8               | 2.5                  | 0.40                            | 17                                  | 20                     | 486         | 572                                 | -19 |
| 19 | N  | 65            | 78                 | 2.1               | 3.0                  | 0.31                            | 18                                  | 20                     | 464         | 587                                 | -23 |
| 20 | O  | 75            | 85                 | 1.5               | 2.0                  | 0.24                            | 26                                  | 30                     | 471         | 599                                 | -20 |
| 21 | P  | 50            | 66                 | 0.8               | 4.6                  | 0.16                            | 25                                  | 29                     | 453         | 574                                 | -27 |
| 22 | Q  | 60            | 91                 | 1.2               | 2.5                  | 0.22                            | 14                                  | 15                     | 467         | 597                                 | -24 |

$$d = (7.11 \times [N_i] + 11) \times (1.2 - t/300)$$

표 5

| 구분 | 번호 | 판 두께<br>(mm) | 강  | 조작                 |                   |                            |                           | 모재 강도                            |             |             | 어레스트성<br>$T_{K_{cr=3000}}$<br>(°C) |    |
|----|----|--------------|----|--------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|------------------------------------|----|
|    |    |              |    | 비이나이트<br>분율<br>(%) | 페라이트<br>분율<br>(%) | 표충조대<br>$\alpha$ 분율<br>(%) | 평균 유연<br>직경<br>( $\mu$ m) | 평균 유연<br>직경<br>$d$<br>( $\mu$ m) | YP<br>(MPa) | TS<br>(MPa) |                                    |    |
|    | 23 | A            | 60 | 58                 | 1.8               | 12                         | 0.46                      | 15                               | 15          | 410         | 521                                | 11 |
|    | 24 | B            | 65 | 68                 | 7.2               | 2.8                        | 0.61                      | 23                               | 23          | 412         | 523                                | 14 |
|    | 25 | B            | 55 | 78                 | 3.8               | 1.0                        | 0.40                      | 26                               | 24          | 470         | 582                                | 12 |
|    | 26 | C            | 70 | 73                 | 2.3               | 1.1                        | 0.82                      | 17                               | 19          | 452         | 541                                | 16 |
|    | 27 | D            | 80 | 74                 | 1.1               | 0.8                        | 0.15                      | 37                               | 34          | 431         | 544                                | 13 |
|    | 28 | E            | 50 | 72                 | 2.3               | 14                         | 0.30                      | 21                               | 22          | 443         | 557                                | 3  |
|    | 29 | E            | 60 | 79                 | 2.6               | 3.8                        | 0.34                      | 24                               | 21          | 510         | 602                                | 8  |
|    | 30 | F            | 65 | 77                 | 3.5               | 0.5                        | 0.23                      | 29                               | 25          | 486         | 585                                | 5  |
|    | 31 | F            | 75 | 79                 | 4.5               | 2.6                        | 0.33                      | 26                               | 24          | 480         | 597                                | 9  |
|    | 32 | G            | 70 | 87                 | 0.9               | 3.6                        | 0.31                      | 22                               | 19          | 472         | 583                                | 12 |
|    | 33 | H            | 80 | 82                 | 1.2               | 1.3                        | 0.55                      | 20                               | 21          | 427         | 531                                | 21 |
|    | 34 | I            | 60 | 80                 | 6.2               | 9.7                        | 0.60                      | 22                               | 16          | 454         | 567                                | 10 |
|    | 35 | J            | 55 | 70                 | 2.7               | 2.0                        | 0.36                      | 21                               | 18          | 485         | 556                                | 4  |
|    | 36 | K            | 60 | 77                 | 2.1               | 4.0                        | 0.36                      | 19                               | 15          | 463         | 580                                | 8  |
|    | 37 | L            | 70 | 81                 | 5.3               | 3.5                        | 0.53                      | 18                               | 18          | 480         | 607                                | 11 |
|    | 38 | M            | 80 | 83                 | 1.9               | 2.5                        | 0.76                      | 19                               | 20          | 475         | 559                                | 15 |
|    | 39 | N            | 65 | 79                 | 2.3               | 3.1                        | 0.35                      | 22                               | 20          | 465         | 586                                | 12 |
|    | 40 | O            | 75 | 80                 | 1.7               | 2.7                        | 0.54                      | 28                               | 30          | 462         | 585                                | 14 |
|    | 41 | P            | 50 | 61                 | 0.9               | 16                         | 0.18                      | 26                               | 29          | 464         | 583                                | 7  |
|    | 42 | Q            | 60 | 86                 | 1.4               | 13                         | 0.26                      | 15                               | 15          | 455         | 576                                | 10 |
|    | 43 | R            | 70 | 82                 | 4.2               | 1.0                        | 0.57                      | 18                               | 19          | 483         | 576                                | 20 |
|    | 44 | S            | 50 | 85                 | 2.0               | 3.2                        | 0.29                      | 16                               | 14          | 482         | 603                                | 7  |
|    | 45 | T            | 50 | 93                 | 0.4               | 0.5                        | 0.48                      | 28                               | 29          | 521         | 667                                | 17 |

$$d = (7.11 \times [N] + 11) \times (1.2 - t/300)$$

밀줄은 본 발명의 범위 밖

[0109]

[0110]

본 발명 예인 No.1 내지 22는 화학 성분이 소정의 범위 내에 있으며, 또한 소정의 조건으로 제조했기 때문에, 모두 YP : 390 내지 460MPa급 강으로서 충분한 강도를 갖고 있으며, 어레스트성도 양호하였다.

[0111]

한편, 비교예인 No.23 내지 45는 화학 성분, 제조 조건 중 어느 하나가 본 발명의 범위를 일탈하고 있기 때문에, 어레스트성이 저하되어버렸다.

[0112]

No.23, 41은 마무리 압연의 온도가  $Ar_3$ 보다 낮아져버려, 표충부에 조대한 페라이트가 다양으로 생성되었기 때문에, 어레스트성이 저하되었다.

[0113]

No.28, 42는 압연 종료 온도는  $Ar_3$  이상이었지만, 가속 냉각 개시 온도가  $Ar_3$  미만이었기 때문에, 역시 표충 조대 페라이트 분율이 높아져 어레스트성이 저하되었다.

[0114]

No.24, 37은 가속 냉각의 냉각 속도가 작았다.

[0115]

No.33, 40은 냉각 정지 온도가 500°C보다도 높았다.

[0116]

No.26, 38은 열처리 온도가 600°C 초과이었기 때문에, 모두 시멘타이트 직경이 커져 충분한 어레스트성이 얻어지지 않았다.

[0117]

No.34는 가속 냉각을 행하지 않고 공냉했기 때문에, 유효 결정립 직경이 미세화되지 않아, 어레스트성이 저하되었다.

[0118]

No.27, 35는 마무리 압연의 누적 압하율이 작았다.

- [0119] No.25, 30, 36은 마무리 압연 온도가 높았기 때문에, 모두 유효 결정립 직경이 조대화되어 어레스트성이 저하되었다.
- [0120] No.29는 가열 온도가 높았다.
- [0121] No.31, 39는 조압연의 누적 압하율이 작았다.
- [0122] No.32는 가열 온도가 높고, 조압연의 누적 압하율도 작았기 때문에, 모두 유효 결정립 직경이 커져, 어레스트성이 저하되어버렸다.
- [0123] No.43은 C 함유량이 많았기 때문에 시멘타이트가 커져, 어레스트성이 저하되는 동시에 HAZ 인성도 저하되었다.
- [0124] No.44는 Ni양이 적었기 때문에 어레스트성이 불충분했다.
- [0125] No.45는 Ceq가 높았기 때문에, 강도가 지나치게 상승되어, 어레스트성이 저하되어버렸다.

### 산업상 이용 가능성

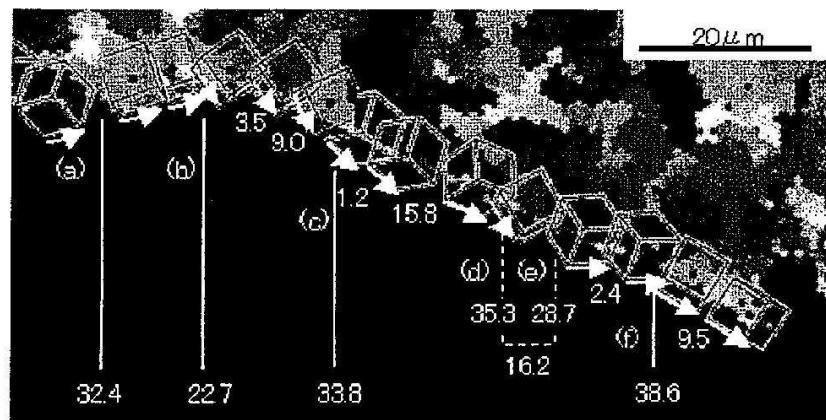
- [0126] 본 발명의 적용에 의해, 판 두께가 50mm 이상인 두꺼운 재료이며, 항복 강도가 390 내지 460MPa급이어도 어레스트성 지표( $T_{kca=6000}$ )가 -10°C 이하로 되는, 대형 구조물에 적용 가능한 고 어레스트 강판을, 안정적이면서 효율적인 제조 방법에 의해 제공하는 것이 가능해지는 점에서, 산업상의 이용성은 매우 크다.

### 도면의 간단한 설명

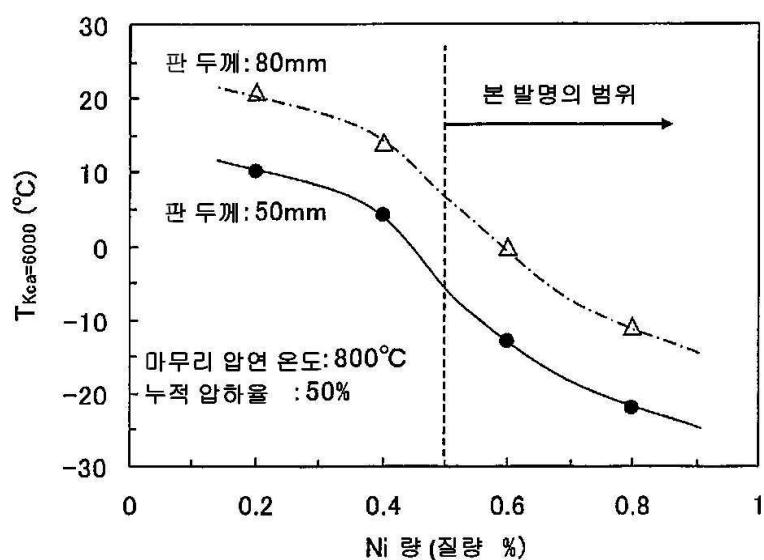
- [0033] 도 1은 EBSP에 의한 결정 방위 맵과 등균열 전파 저항 영역의 경계를 해석한 결과의 일례이다.
- [0034] 도 2는 Ni 첨가량에 수반하는 어레스트성의 변화를 나타내는 그래프이다.
- [0035] 도 3은 어레스트성에 미치는 Ni양과 유효 결정립 직경의 영향을 나타내는 그래프이다.
- [0036] 도 4는 페라이트 분율과 어레스트성의 관계를 나타내는 그래프이다.
- [0037] 도 5는 시멘타이트의 평균 원상당 직경과 어레스트성의 관계를 나타내는 그래프이다.
- [0038] 도 6은 표리면으로부터 판 두께의 5%의 영역에 있어서의 원상당 직경 25μm 초과의 조대 페라이트의 분율과 어레스트성의 관계를 나타내는 그래프이다.
- [0039] 도 7은 소정의 어레스트성을 부여하기 위하여 필요한 Ni양과 유효 결정립 직경의 관계를 나타내는 그래프이다.
- [0040] 도 8은 소정의 어레스트성을 부여하기 위하여 필요한 유효 결정립 직경의 판 두께 의존성을 나타내는 그래프이다.
- [0041] 도 9는 소정의 어레스트성을 부여하기 위하여 필요한 Ni양과 마무리 압연 온도의 관계를 나타내는 그래프이다.
- [0042] 도 10은 소정의 어레스트성을 부여하기 위하여 필요한 마무리 압연 온도의 판 두께 의존성을 나타내는 그래프이다.

## 도면

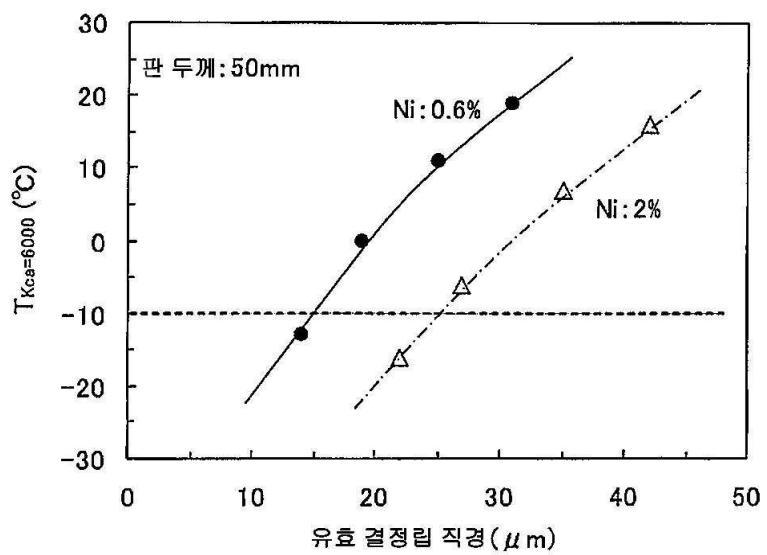
## 도면1



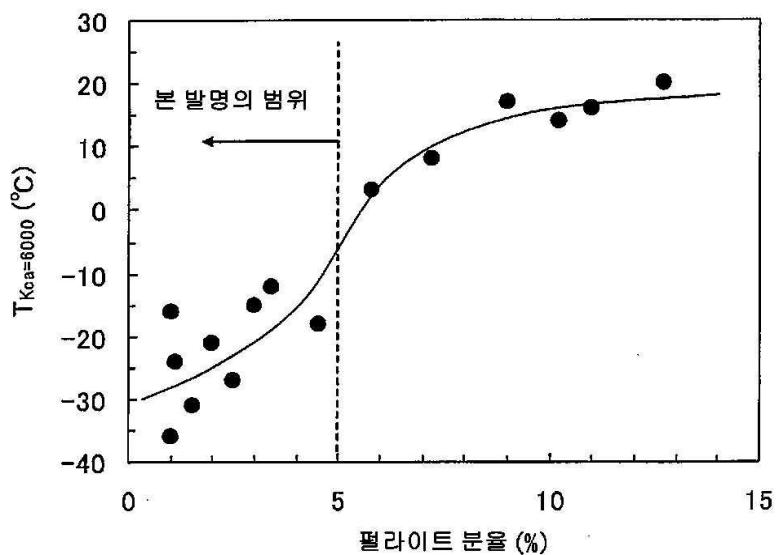
## 도면2



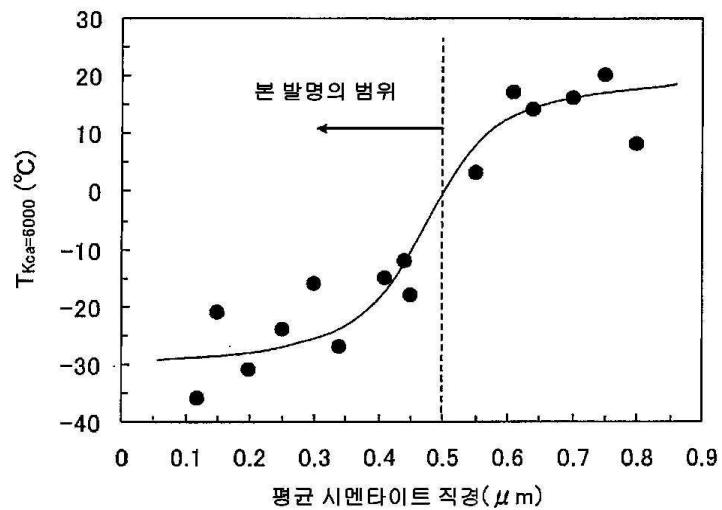
도면3



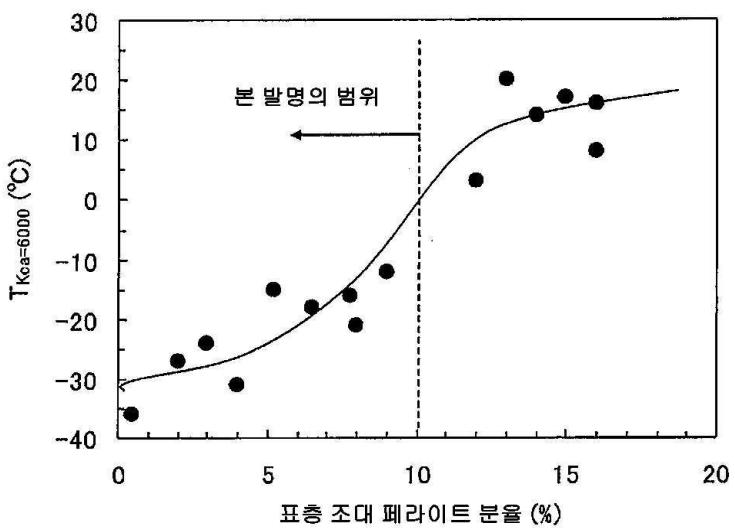
도면4



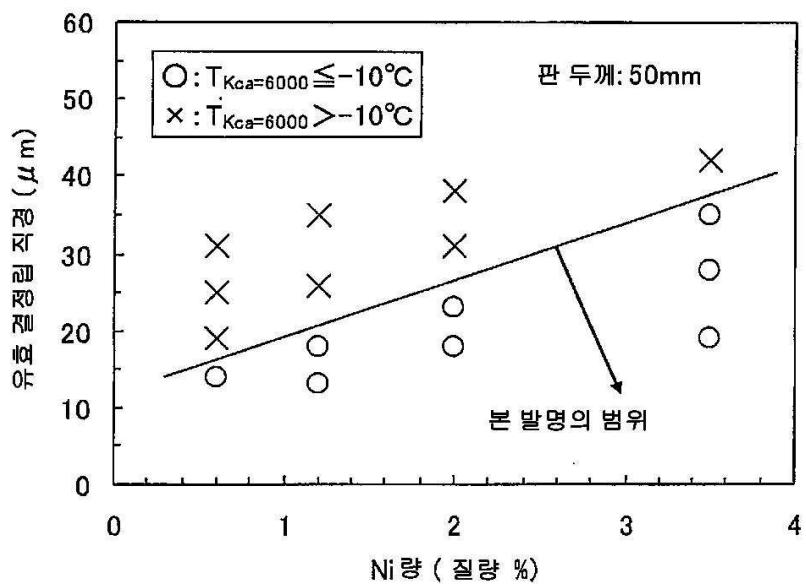
도면5



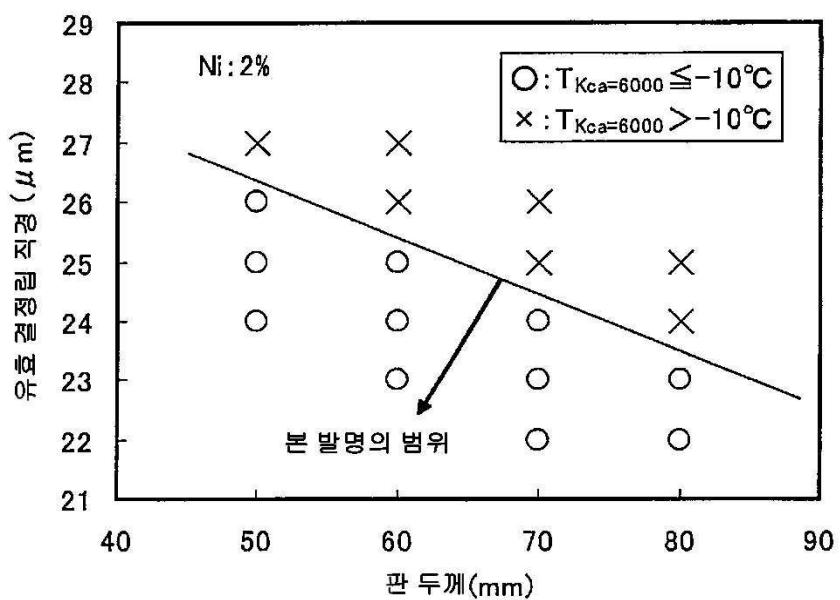
도면6



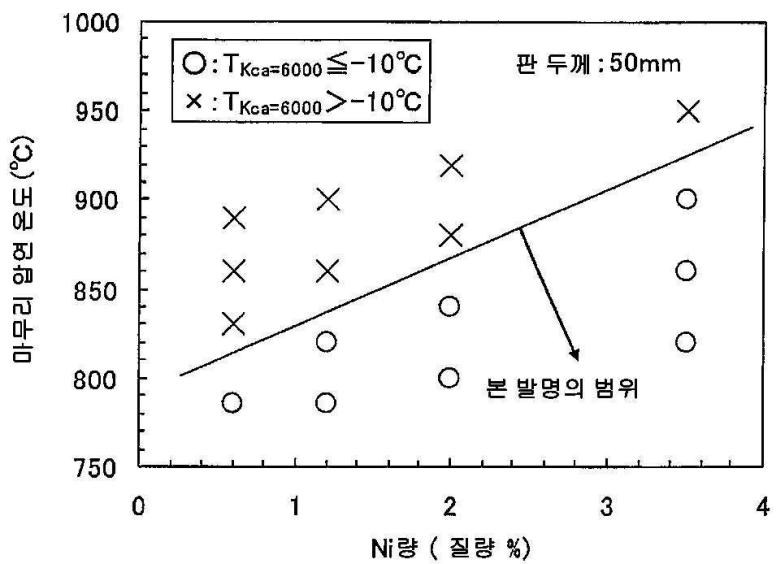
도면7



도면8



도면9



도면10

