

명세서

발명의 명칭: 방향성 전기강판 및 그의 제조 방법

기술분야

- [1] 방향성 전기강판 및 그 제조 방법에 관한 것이다. 더욱 구체적으로 2차 재결정 이 이루어진 전기강판의 표면에 파장이 서로 다른 중첩 레이저를 조사하여 표면 손상을 방지하면서 동시에 우수한 철손 특성을 갖는 방향성 전기강판을 제조하는 방법에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 방향성 전기강판은 우수한 자기적 특성을 가지고 있어 변압기의 철심 재료로 사용된다. 이러한 방향성 전기강판은 전기강판 제조 공정만이 가지고 있는 고유의 압연 및 소둔 공정을 거쳐 {110} <001> 방위로 재결정되어 있는 Goss 집합조직을 강판 전체에 형성시킨다.
- [3] 기후 변화에 대응하기 위해 세계는 온실가스 배출량의 산정등급을 나날이 강화하고 있다. 변압기 철심의 경우, 온실가스 배출량 산정등급에 영향을 주는 요인은 전기강판을 사용할 때의 효율성 향상과 관련이 되어 있다. 그리고 변압기 철심의 효율성은 전기강판의 철손과 자속밀도 즉, 자성 특성이 중요한 요소로 작용하고 있다.
- [4] 전기강판의 자속밀도는 결정 구조에서 자화가 용이한 결정축이 모인 정도, 즉 결정 방위성이 높을수록 자속밀도가 높게 나타나므로 전기강판의 제조 공정이 중요하게 영향을 미칠 수 있다.
- [5] 그리고 전기강판의 철손은 최대 자속밀도 1.7 T에서 50 Hz 주파수의 자기장을 인가하였을 때 측정되는 $W_{17/50}$ [W/kg] 값을 철심소재의 보증 철손값이라고 하고 이 값을 전기강판의 철손의 척도로 일반적으로 사용한다. 그러나 변압기를 설계할 때에는 이 보다 낮은 최대 자속밀도 인 1.5 T에서 50 Hz 주파수의 자기장을 인가하였을 때 측정되는 $W_{15/50}$ [W/kg] 값을 사용하기도 한다. 변압기에서 효율은 이러한 철손 값이 낮을수록 그 효율이 우수하다고 평가한다.
- [6] 따라서 전기강판의 경우 강판의 자속밀도가 높고 철손이 낮을수록 효율이 우수한 변압기 철심으로 사용될 수 있다. 이 중에서 자속밀도는 전기강판의 제조 공정의 상향 평준화로 고 자속밀도를 확보하는 공정기술은 변압기의 효율을 뒷받침할 수 있는 정도로 발달되어 왔기 때문에 철손이 보다 중요한 지표로 평가되고 있다.
- [7] 이러한 철손은 와전류손과 히스테리시스손으로 구분되고 히스테리시스손은 자속밀도가 높으면 낮아지는 경향이 있어서 방향성 전기강판에서 와전류손이 전체 철손을 제어하는 데 중요한 위치를 차지한다. 철손 중 와전류손은 고전적 와전류손과 이상 와전류손으로 구분되고 고전적 와전류손은 강판의 두께에 비

레하므로 강판을 얇게 하면 할수록 고전적 와전류손은 감소한다. 따라서 이상 와전류손을 제어하는 것이 철손을 저감시키는 중요한 기술로 자리 잡고 있다.

- [8] 이러한 철손 중의 와전류손은 압연 방향 자구인 180°자구의 자벽 간격이 좁을수록 감소되는 것이어서 전기강판의 자구(magnetic domain)를 미세화 시켜 철손을 저감시킬 수 있다.
- [9] 전기강판에서 자구를 미세화 한다는 것은 하나의 자구적 특성을 갖는 결정입자에 물리적 자극을 부여하여 여러 개의 자구로 분리하는 과정을 의미한다. 자구를 미세화하는 방법으로는 레이저 조사, 전자빔 조사, 플라즈마 처리, 에칭 또는 롤 압입등의 방법을 이용할 수 있다. 그리고 이러한 자구 미세화 처리를 한 다음 응력 완화소둔(SRA)을 행한 다음에도 자구 미세화 효과가 유지되는지 여부에 따라 영구자구 미세화와 일시자구 미세화로 구분된다.
- [10] 일련의 전기강판의 제조 공정상 자구 미세화 공정은, 탈탄공정 이전에 수행될 수도 있고 절연코팅 이후에 수행되는 경우도 있다.
- [11] 한편, 생산된 전기강판을 코일상태로 출하하여 최종 철심으로 가공될 때까지 제품의 운송 등의 이유로 많은 시간이 필요하다. 이러한 운송기간 동안이나 또는 철심으로 가공하는 동안에 전기강판에 자구미세화를 위하여 물리적으로 자극을 받은 부분이 부식이 될 가능성이 있다.
- [12] 전기강판의 표면에 물리적 자극을 받은 부분에서 부식이 발생한다는 것은 표면의 절연피막이 벗겨져서 전기강판의 기재가 노출되었다는 것을 의미하고, 이를 그대로 철심으로 적층하여 사용할 경우 전기강판 표면에 형성된 절연피막이 파괴되어 상하 적층 철심이 전기적으로 통전하게 되며, 이 경우 변압기가 폭발할 가능성까지 존재하게 된다.
- [13] 따라서 자구미세화를 위해 전기강판의 표면에 물리적 자극을 부여하더라도 절연피막에 손상을 가하지 않는 범위 이내로 자극을 부여할 필요가 있다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [14] 방향성 전기강판 및 그 제조 방법에 관한 것이다. 더욱 구체적으로 2차 재결정이 이루어진 전기강판의 표면에 파장이 서로 다른 중첩 레이저를 조사하여 표면 손상을 방지하면서 동시에 우수한 철손 특성을 갖는 방향성 전기강판의 제조 방법에 관한 것이다.

과제 해결 수단

- [15] 본 발명의 일 실시예에 의한 방향성 전기강판의 자구미세화 방법은 제1 파장의 제1 레이저 빔이 조사되어 형성되고 있는 제1 빔스팟과 제2 파장의 제2 레이저 빔이 조사되어 형성되고 있는 제2 빔스팟으로 이루어지고, 상기 제1 빔스팟이 상기 제2 빔스팟의 내부에 일부 또는 전부가 위치하도록 제어되어 형성되고 있는 중첩 레이저빔을 전기강판의 표면에 조사하여 변형부를 형성하는 것이다.

- [16] 이 때 중첩 레이저빔의 제1 레이저는 단파장 레이저이고 제2 레이저는 상기 단파장 레이저의 파장 보다 긴 파장의 장파장 레이저인 것이 바람직하다.
- [17] 본 발명의 또 다른 실시예에 의한 방향성 전기강판의 자구미세화 방법은 제1 레이저와 제2 레이저를 동시에 중첩한 중첩 레이저빔을 2차 재결정이 이루어진 전기강판의 표면에 압연방향의 직각 또는 경사진 방향으로 조사하여 선상의 변형부를 형성하는 것이다.
- [18] 여기서 제1 레이저 또는 제2 레이저의 빔 형상은 타원형 또는 원형 중 어느 하나인 것이 바람직하다.
- [19] 그리고 제1 레이저는 광섬유 레이저, YAG 레이저 또는 디스크 레이저 중 어느 하나이고, 제2 레이저는 CO₂ 레이저인 것이 바람직하다.
- [20] 이 때 제1 레이저로 광섬유 레이저를 적용할 경우 그 빔 스팟은 폭이 10 내지 200 μm 이고, 길이는 상기 CO₂ 레이저 빔 스팟의 길이 이하 또는 그 이상의 타원형 또는 원형인 것이 바람직하다.
- [21] 또한 제2 레이저로 CO₂ 레이저를 적용할 경우 그 빔 스팟은 폭이 100 내지 400 μm 이고, 길이는 0.4 내지 20 mm 인 타원형 빔 스팟인 것이 바람직하다.
- [22] 이상의 중첩 레이저빔을 강판의 표면에 조사할 경우 그 조사 간격은 2 ~ 10 mm 이고, 주사 속도는 0.1 내지 300 m/sec인 것이 바람직하다.
- [23] 그리고 이러한 중첩 레이저 빔의 경사 방향은 $\pm 10^\circ$ 이하인 것이 바람직하다.
- [24] 여기서 제1 레이저인 광섬유 레이저의 출력은 10 내지 150 W이고, YAG 레이저의 출력은 10 내지 250 W이며, 제2 레이저인 CO₂ 레이저의 출력은 200 내지 500 W 인 것이 바람직하다.
- [25] 본 발명의 또 다른 실시예에 의한 방향성 전기강판은 전기강판 기재; 와
- [26] 이 전기강판 기재 상에 위치하는 절연 피막층을 포함하고, 이 전기강판 기재의 표면에 하나 이상의 선형의 변형부가 형성되고 이러한 전기강판의 자연부식 전위값이 (-) 350 mv 이상이다.
- [27] 이 때 전기강판 기재와 절연 피막층 사이에 유리 피막층이 더 형성될 수 있다.
- [28] 그리고 이러한 전기강판의 자연부식 전위값은 (-) 50 내지 (-) 300 mV 인 것이 더욱 바람직하다.
- [29] 한편, 상기 절연 피막층의 표면에 재응고층이 형성되어 있다.
- [30] 이러한 재응고층의 두께는 절연 피막층 단면 두께의 20% 이내인 것이 바람직하다.
- [31] 그리고 본 발명의 일 실시예에 따른 전기강판의 W15/50 철손 개선율은 6 % 이상인 것이 바람직하고, W17/50 철손 개선율은 9 % 이상인 것이 바람직하다.
- [32] 본 발명의 또 다른 실시예에 의한 방향성 전기강판은 전기강판 기재; 와 상기 전기강판 기재 상에 위치하는 절연 피막층을 포함하고, 상기 전기강판의 표면에 하나 이상의 선형의 변형부가 형성되며, 상기 선형의 변형부 상부의 상기 절연 피막층 표면에 재응고층이 형성되어 있다.

- [33] 이 때 전기강판 기재와 절연 피막층 사이에 유리 피막층이 더 형성될 수 있다.
- [34] 그리고 이러한 변형부 상부의 절연 피막층의 두께는 변형부가 미형성된 영역 상부의 절연 피막층의 두께의 60% 이상인 것이 바람직하다.
- [35] 또한 재응고층은 규소 산화물을 주성분으로 하고, 절연 피막층은 인산염 또는 콜로이달 실리카를 주성분으로 하는 것이 바람직하다. 여기서 재응고층의 두께는 절연 피막층 단면 두께의 20% 이내인 것이 바람직하다.

발명의 효과

- [36] 본 발명의 일 구현예에 따르면, 파장이 서로 다른 중첩 레이저를 사용하여 최적의 자구 미세화를 수행함으로써, 자성을 더욱 향상시킬 수 있으면서 동시에 강판 표면의 손상을 충분히 억제할 수 있다.
- [37] 본 발명의 또 다른 구현예에 따르면, 장파장 레이저를 사용하여 평균출력의 고출력화가 용이하게 가능하고 처리 라인의 신뢰성을 확보할 수 있으며, 동시에 단파장의 레이저를 함께 조사하여 자구를 최소한으로 형성하여 자성을 효과적으로 개선할 수 있다.
- [38] 방향성 전기강판의 철손 개선에 있어서 CO₂ 레이저만을 이용할 경우 절연 피막의 두께에 따라 철손 특성의 개선효과에 편차가 발생할 수 있지만, 본 발명에 의한 이 중 레이저를 중첩하여 사용할 경우 철손 개선 효과를 유지하면서도 피막에 의한 자성 편차를 억제하는 것이 가능하다.
- [39] 본 발명의 일 실시예에 따른 자구 미세화 방법은 장파장 레이저로 CO₂ 레이저를 사용하여 피막층들을 파괴하지 않고도 안정적으로 강판을 예열할 수 있으며, 단파장 레이저로 광섬유 레이저를 사용하여 피막층의 두께를 고려하지 않고 정확하게 환류자구 형성에 필요한 만큼의 폭으로 강판의 열 탄성 변형에 따른 잔류 응력을 유발시킬 수 있어서 정확한 자구 미세화가 가능하다.
- [40] 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자구 미세화 방법은 2차 재결정이 완료한 강판 표면에 파장이 서로 다른 레이저를 겹쳐진 상태로 동시에 조사하여 낮은 레이저 출력 조건에서도 두께 방향 열충격을 극대화함으로써 저 자장 및 고 자장 철손이 우수한 방향성 자구미세화 제품을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [41] 도 1은 레이저 파장에 따른 강판의 광 흡수율을 나타내는 그래프이다.
- [42] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 파장이 다른 중첩 레이저를 이용하여 변형부를 형성하는 자구 미세화의 개념을 나타낸 모식도이다.
- [43] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 파장이 다른 중첩 레이저의 빔 스폿을 강판 위에 주사한 경우를 나타내는 모식도이다.
- [44] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 파장이 다른 중첩 레이저의 빔 스폿을 강판 위에 주사한 경우의 에너지 밀도를 나타내는 모식도이다.
- [45] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른, 강판의 자연부식 전위값을 측정하는 장치의 작업전극을 나타낸 도면이다.

- [46] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른, 강판의 자연부식 전위값을 측정하는 장치를 나타내는 도면이다.

발명의 실시를 위한 형태

- [47] 제1, 제2 및 제3 등의 용어들은 다양한 부분, 성분, 영역, 층 및/또는 섹션들을 설명하기 위해 사용되나 이들에 한정되지 않는다. 이들 용어들은 어느 부분, 성분, 영역, 층 또는 섹션을 다른 부분, 성분, 영역, 층 또는 섹션과 구별하기 위해서만 사용된다. 따라서, 이하에서 서술하는 제1 부분, 성분, 영역, 층 또는 섹션은 본 발명의 범위를 벗어나지 않는 범위 내에서 제2 부분, 성분, 영역, 층 또는 섹션으로 언급될 수 있다.
- [48] 여기서 사용되는 전문 용어는 단지 특정 실시예를 언급하기 위한 것이며, 본 발명을 한정하는 것을 의도하지 않는다. 여기서 사용되는 단수 형태들은 문구들이 이와 명백히 반대의 의미를 나타내지 않는 한 복수 형태들도 포함한다. 명세서에서 사용되는 "포함하는"의 의미는 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소 및/또는 성분을 구체화하며, 다른 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소 및/또는 성분의 존재나 부가를 제외시키는 것은 아니다.
- [49] 어느 부분이 다른 부분의 "위에" 또는 "상에" 있다고 언급하는 경우, 이는 바로 다른 부분의 위에 또는 상에 있을 수 있거나 그 사이에 다른 부분이 수반될 수 있다. 대조적으로 어느 부분이 다른 부분의 "바로 위에" 있다고 언급하는 경우, 그 사이에 다른 부분이 개재되지 않는다.
- [50] 다르게 정의하지는 않았지만, 여기에 사용되는 기술용어 및 과학용어를 포함하는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 일반적으로 이해하는 의미와 동일한 의미를 가진다. 보통 사용되는 사전에 정의된 용어들은 관련기술문헌과 현재 개시된 내용에 부합하는 의미를 가지는 것으로 추가 해석되고, 정의되지 않는 한 이상적이거나 매우 공식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [51] 이하, 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다.
- [52] 본 발명의 일 실시예에서는 전기강판의 표면에 파장이 서로 다른 중첩 레이저를 조사하여 표면 손상을 방지하면서 동시에 우수한 철손 특성을 부여하고자 하는 것을 목적으로 한다.
- [53] 방향성 전기강판에서 철손을 향상시키는 방법 중 하나로 레이저를 이용하여 자구를 미세화 하는 방법이 선호되고 있다.
- [54] 방향성 전기강판의 자구 미세화 공정은 도 2에서 예시한 바와 같이, 전기강판 전장(全長)에 걸쳐 강판의 압연 방향(RD방향)의 수직 또는 경사진 방향, 즉 강판의 폭 방향(TD방향)을 따라 레이저를 조사하여 변형부(10) 또는 선(線)상의 변형

부를 형성하게 된다. 여기서 선상의 변형부란 실선 뿐만 아니라 점선이나 파선과 같이 단속적으로 이어지는 것을 포함하고, 아울러 미시적으로 보면 지그재그 형태이지만 거시적으로 보면 직선형태도 포함하여, 실질적으로 선형을 형성하는 모든 변형부를 포함한다.

- [55] 레이저에 의한 강판에서의 변형부 형성은 레이저 조사로 열충격을 받아 발생한 결정격자의 변형을 의미하고, 이러한 결정격자의 변형은 레이저에 의하여 강판이 국부적으로 급속하게 가열되고 바로 냉각되는 과정에서 형성된다. 이때 강판의 가열 속도는 레이저 단위 시간당 에너지 밀도(파워밀도)에 비례한다.
- [56] 그러나 레이저 조사시 열충격에 의한 결정격자의 변형은 레이저 총 조사 에너지가 클 수록 커지므로, 자구 미세화에 필요한 크기 이상의 에너지가 강판에 조사될 경우 환류자구 형성에 필요한 이상의 열원이 주변으로 확산하여 자기 변형이 커진다. 따라서 레이저 조사시 열충격에 의한 결정격자의 변형은 정확히 환류자구 형성에 필요한 만큼만의 격자 변형 에너지가 필요하고, 열 확산을 억제하기 위해서는 레이저 입사 에너지를 좁은 영역에 보다 단시간 동안만 조사하는 것이 바람직하다.
- [57] 그리고 레이저 빔과 강판의 상호 작용 조건은 레이저의 특성과 강판에 대한 레이저 빔의 흡수율에 영향을 받는다. 레이저 빔의 흡수율은 강판의 표면거칠기, 강판의 온도, 강판 표면의 피막 흡수 특성 그리고 레이저 파장에 영향을 받는다. 그러나 피막을 형성하는 방향성 전기강판의 제조 조건을 일정하게 하였을 때 강판의 표면 거칠기, 강판의 온도 그리고 강판 표면 피막의 흡수 특성은 일정할 것이고, 이 경우 레이저 빔의 강판 흡수율은 레이저의 파장에 따르게 된다.
- [58] 즉 강판의 제조조건이 일정할 경우 레이저 흡수율은 레이저의 파장에 영향을 받는다. 도 1에서 나타낸 바와 같이, 강판의 레이저 흡수율은 파장이 단파장 (예; 1.06 μm 인 YAG 또는 Fiber 레이저)인 경우 대략 35 ~ 40% 정도인 한편, 파장이 장파장 (예; 10.6 μm 인 CO₂ 레이저)인 경우 대략 5 ~ 10% 정도로 상대적으로 낮게 나타난다.
- [59] 이와 같이 방향성 전기강판의 레이저에 의한 자구를 미세화 시키는 공정에서 안정적인 철손 특성을 확보하기 위하여 단파장의 레이저를 사용하는 것이 장파장의 레이저를 사용하는 것 보다 더 효율적이다.
- [60] 한편, 자구미세화 처리 대상이 되는 전기강판의 표면에는 수 내지 수십 μm 두께의 인산염과 실리카를 주성분으로 하는 절연피막이 형성되어 있다. 이들 피막은 단파장의 레이저(예; 1.06 μm 인 YAG 또는 Fiber 레이저)에 대해서는 레이저 빔을 상대적으로 작게 흡수하지만 장파장의 레이저 (예; 10.6 μm 인 CO₂ 레이저)에 대해서는 큰 흡수를 나타낸다. 그 결과 장파장 레이저에서는 절연피막의 두께를 고려하여야 하지만 단파장 레이저에서는 장파장 레이저 보다는 절연피막 두께를 덜 고려하여도 된다.
- [61] 이상과 같이 단파장 레이저와 장파장 레이저는 그 특성이 서로 다르다. 따라서 단파장의 레이저와 장파장의 레이저를 동시에 중첩하여 사용할 경우, 각 레이저

들이 자구 미세화에 적용되는 장점들만 부작용 없이 우선적으로 발휘되어 상호 상승(시너지) 효과를 유발시킬 수 있게 된다.

- [62] 여기서 이중 레이저를 중첩하여 사용한다는 것은 강판의 표면에 조사되는 레이저 빔을 파장이 다른 2가지 이상의 레이저를 사용하고, 강판의 표면에 형성되고 있는 하나의 레이저 빔의 스팟이 다른 레이저 빔의 스팟 내에 일부 또는 전부가 위치하는 것을 의미한다. 따라서 본 발명의 일실시예에서 파장이 다른 중첩 레이저라 함은 하나의 레이저 빔의 스팟 내에 다른 레이저 빔의 스팟이 완전히 포개어져서 겹쳐진 것 뿐만이 아니라 일부 부분적으로 겹쳐진 것을 모두 포함한다.
- [63] 도 2 내지 도 4에서와 같이, 본 발명의 일실시예 따른 자구 미세화에 사용하는 중첩 레이저(30)에서 단파장의 레이저는 주력 레이저로 제1 레이저(A)라고 하고, 장파장의 레이저는 제1 레이저보다 파장이 긴 레이저로 보조 레이저로 제2 레이저(B)라 한다.
- [64] 단파장 레이저인 제1 레이저(A)는 파장이 상대적으로 짧은 레이저를 사용할 수 있으며 예를 들면 광섬유(Er-Fiber, Yb-Fiber, Tm-Fiber) 레이저, YAG (Nd:YAG, Yb:YAG) 레이저, 루비 레이저 및 사파이어 레이저 등을 사용할 수 있다. 이 뿐만이 아니라 이러한 제1 레이저(A)로는 Disk 레이저 ($1.03\mu\text{m}$), Diode 레이저 ($0.808\sim 0.980\mu\text{m}$) 또는 UV 레이저($0.150\sim 0.355\mu\text{m}$) 를 사용할 수도 있다.
- [65] 그리고 장파장 레이저인 제2 레이저(B)로는 단파장 보다 상대적으로 파장이 긴 레이저를 사용한다. 예를 들어 제2 레이저로는 CO_2 레이저가 바람직하다. 그러나 만약 단파장 레이저인 제1 레이저로 UV 레이저 ($0.150\sim 0.355\mu\text{m}$) 를 사용할 경우 제2 레이저는 제1 레이저 보다 파장이 긴 레이저라면 어느 레이저라도 사용할 수 있다. 이러한 경우의 예를 들면, 제1 레이저로 UV 레이저 ($0.150\sim 0.355\mu\text{m}$) 를 사용한 경우 제2레이저로 YAG 레이저를 사용할 수도 있다.
- [66] 이하에서는 단파장인 제1 레이저(A)로 광섬유 레이저를 사용하고 장파장인 제2 레이저(B)로 CO_2 레이저를 사용한 경우를 예로 들어 중첩 레이저(30)를 사용한 자구 미세화 방법에 대하여 보다 자세히 설명한다.
- [67] 제1 레이저(A)인 광섬유 레이저는 강판에 대한 레이저 흡수율이 상대적으로 높은 단파장의 레이저 파장을 사용하므로, 정확히 환류자구 형성에 필요한 만큼만의 격자 변형 및 열 탄성 변형에 의한 잔류 응력을 유발할 정도의 입사 에너지를 좁은 영역에 보다 단시간 동안만 조사하는 것이 가능하다. 또한 제1 레이저(A)로 사용하는 광섬유 레이저는 입사 에너지 범위가 좁기 때문 주변으로의 열 확산을 억제할 수 있어서 불필요한 열변형을 최소화할 수 있다.
- [68] 한편 제2 레이저(B)인 CO_2 레이저는 평균 출력을 강판 속도에 따라 수백W에서 수KW 이상의 고출력으로 사용하는 것이 가능하고, 강판의 조사 부분에 열탄성 변형을 용이하게 유도할 수 있다. 또한 제2 레이저(B)인 CO_2 레이저는 인산염과 실리카로 이루어진 절연피막에 대한 흡수율이 높아 피막층들을 안정적 통과할 수 있다. 따라서 제2 레이저(B)인 CO_2 레이저는 절연피막층들을 파괴하지 않고

도 안정적으로 강판의 열탄성 변형을 유도할 수 있어서 일종의 예열 역할을 하는데 적합하다. 그러나 제2 레이저(B)인 CO₂ 레이저는 강판에 대한 레이저 흡수율이 낮기 때문에 강판의 열탄성 변형은 유도 하지만 영구변형을 유발하지 않을 정도로 레이저를 조사하는 것이 바람직하다.

- [69] 즉, 제2 레이저(B)인 CO₂ 레이저와 같이 장파장의 레이저를 사용할 경우 강판에 열충격을 부여하는 부분이 너무 넓게 이루어져 자구 세분화가 잘 발생하지 않기 때문에 파장이 상대적으로 짧은 광섬유 레이저를 제1 레이저(A)로 하여 자구 미세화를 위한 주 레이저로 사용하고, 파장이 상대적으로 긴 CO₂ 레이저는 강판의 열탄성 변형을 유도하는 정도의 일종의 예열 역할을 하는 보조 레이저로 사용한다.
- [70] 이와 같이 제1 레이저(A)로 단파장인 광섬유 레이저를 선택하여 자구 미세화를 위한 주 레이저로 사용한 이유는 강판 표면에서의 레이저 흡수율이 높아서 레이저 조사부에 강한 압축응력부를 형성되며, 이러한 압축응력부에서 자기탄성에너지 감소를 위해 란셋자구(환류자구)를 용이하게 형성시킬 수 있기 때문이다.
- [71] 이 경우 자구미세화에 의해 표면방향으로 자기탄성에너지(magnetoelastic energy)에 의해 180°자구(란셋자구의 반대자극)를 형성하고, 판두께 방향으로 자기탄성 에너지를 감소하기 위해 90°자구를 형성시킴으로써 자구의 간격이 좁아지면서 결과적으로 이상 와전류손을 감소시키게 된다.
- [72] 이상과 같이 본 발명의 일 실시예에 따른 자구 미세화 방법은 제1 레이저로 단파장인 광섬유 레이저를 사용하여 정확히 환류자구 형성에 필요한 만큼의 폭으로 강판의 열탄성 변형에 따른 잔류 응력을 유발시킬 수 있어서, 정확한 자구 미세화가 가능한 한편, 제2 레이저로 장파장인 CO₂ 레이저를 사용하여 피막층들을 파괴하지 않고도 안정적으로 강판을 예열할 수 있게 된다.
- [73] 또한 제1 레이저(A)인 단파장의 광섬유 레이저는 최종 빔 폭(**beam width**)을 작게 형성시킬 수 있고, 강판내 레이저 흡수율을 향상시키는 장점이 있으나, 초점심도(**depth of field**)는 상대적으로 짧다. 그러나 파장이 긴 제2 레이저(B)인 CO₂ 레이저는 최종 빔의 폭이 넓고, 강판내 레이저 흡수율이 상대적으로 낮으나, 초점심도가 깊다는 장점을 갖고 있다. 따라서 이들 두 레이저 빔을 동시에 중첩하여 조사할 경우 강판내의 레이저 흡수율을 보다 상승시킬 수 있게 된다.
- [74] 이 때 강판의 표면에 조사되는 단파장 제1 레이저(A)인 광섬유 레이저의 빔 스팟은 원형에 근사한 모양이 바람직하며 그 직경은 10 내지 200 μm 이 바람직하다. 또한 광섬유 레이저의 빔 스팟은 그 폭(도 2에서 “RD방향”의 길이)이 10 내지 200 μm 이고 그 길이(도 2에서 “TD 방향”의 길이)는 제2 레이저(B)인 CO₂ 레이저 빔 스팟의 길이 이하이거나 그 이상으로도 사용이 가능하다.
- [75] 제1 레이저(A)인 광섬유의 빔 폭이 10 μm 미만으로 감소하게 되면 좁은 영역에 에너지밀도가 집적이 됨에 따라 자속밀도 및 철손 열위가 나타날 수 있으며, 광학계 구조가 복잡해지는 문제점이 있다. 그리고 제1 레이저(A)인 광섬유의 빔폭

- 이 200 μm 이상 커지면 강판 길이방향 열영향이 커져서 자속밀도의 저하가 나타날 수 있어서 바람직하지 않는다.
- [76] 한편, 강판의 표면에 조사되는 장파장의 제2 레이저(B)인 CO₂레이저의 빔 스팟은 그 빔폭(도 2에서 “RD방향”의 길이)이 100 내지 400 μm 이고, 빔 길이(도 2에서 “TD 방향”의 길이)가 0.4 내지 20 mm 인 타원형이 바람직하다. 또한 장파장 CO₂ 레이저의 빔 스팟은 반경이 100 μm 이상의 원형으로도 사용이 가능하다.
- [77] 제2 레이저(B)인 CO₂ 빔폭이 100 μm 이내로 형성시키기 위해서는 광섬유 레이저와 같이 미리 광학계가 복잡해지기 때문에 바람직하지 않으며, 400 μm 이상 커지면 강판 길이방향 열영향이 커지기 때문에 자속밀도의 저하가 나타나기 때문에 바람직하지 않는다.
- [78] 이와 같이 장파장 제2 레이저(B)인 CO₂레이저의 빔 스팟의 크기를 한정하는 이유는 고속으로 이동하는 강판의 표면에 고속으로 레이저를 주사하는 경우 강판에 작용하는 레이저 빔의 열적 변형 효과가 유지되는 범위를 고려한 것이다.
- [79] 본 발명의 일실시예에 따른 파장이 서로 다른 이 중 레이저를 동시에 중첩하여 사용하는 경우에 대하여 좀 더 자세히 설명한다.
- [80] 도 2 내지 도 4 에서와 같이 제1 레이저(A)인 광섬유 레이저와 제2 레이저(B)인 CO₂레이저를 중첩하여 사용한다는 것은 빔 스팟이 작은 제1 레이저(A)가 강판의 표면에 조사되면서 빔 스팟이 큰 제2 레이저 빔(B)의 범위 내에서 위치하도록 제어된다는 것을 의미한다. 즉, 강판 표면에 조사되는 이 중 레이저 빔 스팟(20)들이, 도 3에서와 같이 평면상으로 보아서, 빔 스팟이 큰 제2 레이저(B)인 CO₂레이저 빔의 범위 내의 어느 곳에서도 제1 레이저(A)인 광섬유 레이저 빔이 온전히 위치하는 것을 빔이 “중첩”된다고 하고, 더 나아가 제2 레이저(B)인 CO₂레이저 빔의 범위 내에 제1 레이저(A)인 광섬유 레이저 빔이 부분적으로 위치하는 것까지 포함하여 빔이 “중첩”된다는 것을 의미한다.
- [81] 그리고 도 4에서와 같이, 단파장의 제1 레이저 빔(A)의 가우시안 형상(a, b, c)중 (b)의 위치가 장파장의 제2 레이저 빔(B)의 세기가 높은 곳에 동시에 위치하는 것이 바람직하고 이 경우를 본 발명에서는 강판 표면에 조사되는 이 중 파장의 중첩 레이저(20)가 “동시에 중첩”된다는 것을 의미한다.
- [82] 본 발명의 일실시예에서 사용하는 레이저 빔의 발진 모드는, 제1 레이저(A)와 제2 레이저(B) 모두, 레이저 광을 연속적을 발생시키는 연속파 레이저(Continuous Wave Laser)를 사용하는 것이 바람직하지만, 펄스 레이저(Pulse Laser)를 사용할 수도 있다.
- [83] 또한 사용하는 레이저 빔의 품질은, 제1 레이저(A)와 제2 레이저(B) 모두, TEM₀₀의 가우시안 모드(Gaussian mode)가 바람직하지만 TEM_{0i}의 멀티 모드(multi transverse mode)도 사용할 수 있다.
- [84] 그러나 본 발명의 일실시예에 따른 강판 표면에 조사되는 이종 파장의 중첩 레이저빔(20)은 강판의 길이 방향으로 열영향을 최소화하는 반면 두께 방향으로 열

충격을 극대화할 수 있으므로 각 레이저의 빔 형상이나 빔 품질을 구체적으로 한정하는 것은 아니다.

- [85] 한편, 제1 레이저(A)인 광섬유 레이저의 출력은 10 내지 150 W가 바람직하고, 제2 레이저(B)인 CO₂의 출력은 200 내지 500 W가 바람직하다. 그리고 제1 레이저(A)로 YAG 레이저를 사용할 경우 그 출력은 10 내지 250 W가 바람직하다. 이러한 각 레이저의 출력 범위는 강판 진행속도가 15mpm 속도로 진행할 때 레이저 출력조건을 적시한 것으로 레이저의 출력값은 강판의 진행속도에 따라 최적으로 제어하는 것이 바람직하다.
- [86] 이상과 같은 제1 레이저(A)와 제2 레이저(B)가 중첩된 레이저 빔(30)을 강판의 표면에 조사할 때 그 간격은 2 ~ 10 mm가 바람직하고, 압연방향에 경사진 각도는 $\pm 10^\circ$ 이하가 바람직하며, 주사 속도는 0.1 내지 300 m/sec가 바람직하다.
- [87] 이 때 사용하는 전기강판은 2차 재결정이 이루어진 전기강판을 사용하는 것이 바람직하다.
- [88] 그리고 강판 표면에 조사되는 중첩 레이저 빔(20)의 조사간격이 2mm 미만으로 너무 좁아지면, 열영향부의 영향이 커져서 자속밀도와 철손이 열위하게 되며, 조사간격이 10mm 이상에서는 자구 미세화 효과를 확보하기 위한 열충격 효과가 떨어져서 효과를 발휘하기 쉽지 않다.
- [89] 또한 강판 표면에 조사되는 중첩레이저 빔(20)을 조사할 때 강판 압연방향의 직각 또는 경사진 방향으로 조사할 수 있고 압연방향에 경사진 각도는 $\pm 10^\circ$ 이하가 바람직하다. 이 각도 이상으로 경사진 각도로 중첩 레이저 빔을 조사할 경우 필요한 자구 미세화 효과가 나타나지 않을 수 있다.
- [90] 그리고 중첩 레이저의 주사속도는 강판 진행속도와 동일하게 진행속도가 빨라지면 해당 주사속도는 더 빨라져야 하므로, 0.1 내지 300 m/sec가 바람직하며, 이 속도는 15mpm 조건에서 예시한 값을 의미한다.
- [91] 본 발명의 또 다른 일 실시예는 전기강판 기재와 상기 전기강판 기재 상에 위치하는 절연 피막층을 포함하고, 상기 전기강판 기재의 표면에 하나 이상의 선형 변형부가 형성되며 상기 강판의 자연부식 전위값이 (-) 350 mV 이상인 방향성 전기강판을 제공한다.
- [92] 이러한 방향성 전기강판은 전기강판 기재와 절연 피막층 사이에는 유리 피막층이 더 형성될 수 있다.
- [93] 여기서 유리 피막층은 포스테라이트(Forsterite)를 주성분으로 하고 절연피막층은 인산염과 콜로이달 실리카를 주성분으로 한다. 그리고 본 발명에서 주 성분이란 함은 포스테라이트의 경우 강판 표면의 산소 편면 도포량으로 0.7 g/m² 이상을 포함하는 것을 의미하고, 절연피막에서 인산염의 경우 강판 표면의 편면 도포량 기준으로 0.1 g/m² 이상을 포함하고 절연피막에서 콜로이달 실리카는 강판 표면의 편면 도포량 기준으로 0.1 g/m² 이상을 포함한다는 것을 의미한다.
- [94] 그리고 자연부식 전위값은 개방회로의 전위를 측정하는 것으로 통상의 기술자들에게 통용되고 있는 것과 같이 개방회로 전위 측정법으로 측정한다.

- [95] 자연부식 전위값은 개방회로 전위(Open Circuit Potential, OCP)법에 따라 전위값을 측정하는 것으로 자연부식 전위값이 “0” 일 경우 부식이 일어나지 않는 것을 의미하고 (-) 음의 값이 커질수록 부식이 잘 발생하는 것을 의미한다. 그리고 자연부식 전위값의 측정조건은 30°C로 항온이 유지되는 3.5% NaCl 용액 중에서 600 초 (10분) 유지후 측정한 결과로 표시하는 것이 바람직하다.
- [96] 또한 본 발명에 의한 선상의 변형부(10)가 형성된 강판에서 자연부식 전위값이 (-) 350 mV 이상이라 함은 “0” 에서 (-) 350 mV 사이의 값으로 부식이 잘 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 이 때 전기강판에 형성된 선상의 변형부는 측정하고자 하는 시편에 대하여 전해액에 노출되는 노출면에 적어도 하나 이상의 선상 변형부가 형성되어 있는 것을 의미한다.
- [97] 본 발명의 일실시예에서 보다 바람직한 전기강판의 자연부식 전위값은 (-) 50 내지 (-) 300 mV이다. 이와 같이 전기강판의 자연부식 전위값이 (-) 50 mV 이상일 경우 선상의 변형부를 형성이 불완전하게 이루어져서 필요한 철손 특성을 확보할 수 없을 수 있다. 그리고 전기강판의 자연부식 전위값이 (-) 300 mV 이하일 경우 선상의 변형부가 형성되어도 부식특성이 다소 저하될 수 있다.
- [98] 한편, 본 발명의 일실시예에서 선상의 변형부(10)는 파장이 서로 다른 레이저 빔들이 중첩된 중첩 레이저빔(20)을 강판의 표면에 조사할 경우, 장파장의 제2 레이저(B)에 의한 빔 폭이 큰 부분과 단파장의 제1 레이저(A)에 의한 빔폭이 작은 부분이 공통으로 중첩된 빔 스팟(20)에 의하여 형성되는 변형부를 의미하고 이 변형부의 폭은 단파장 제1 레이저 빔(A)의 빔폭 또는 빔 직경에 같거나 근사한 값을 가지게 된다.
- [99] 또한 이러한 중첩 레이저빔(30)을 조사하여 강판에 형성된 선상의 변형부(10)의 상부, 즉 중첩 레이저 빔이 직접 맞닿는 절연 피막층의 표면에 절연 피막층이 부분적으로 용융한 다음 재응고된 재응고층이 형성된다.
- [100] 이러한 절연 피막층의 표면에 형성되는 재응고층은 중첩 레이저빔(20)이 조사된 부분의 직하부에 주로 형성되며, 이러한 재응고층은 중첩 레이저빔(20)이 조사된 궤적을 따라 단속적으로 또는 연속적으로 선상 형태로 나타날 수 있다.
- [101] 이와 같이 절연피막이 형성된 강판의 표면에 중첩 레이저(20)를 조사할 경우 절연 피막층을 형성하고 있는 일부 인산염이 중첩 레이저에 의하여 용융되고 중첩 레이저빔이 지나간 다음 바로 응고하게 되는 것으로 추정된다.
- [102] 이러한 부분 재응고층이 형성되는 것은 중첩 레이저빔을 구성하는 각각의 제2 레이저 (CO₂ 레이저) 또는 제1 레이저(광섬유 레이저)를 단독으로 조사한 경우에는 나타나지 않는 현상이다. 다만 제1 레이저(광섬유 레이저)를 단독으로 조사하여 유효한 철손을 확보할 수 있을 정도의 고출력으로 조사한 경우 일부 재응고층이 나타나지만 이 경우에도 절연 피막층 표면에 수포가 발생하는 등 표면이 벗겨지고 손상되어 자연부식 전위값이 매우 낮게 나타난다.

- [103] 즉, 제1 레이저(광섬유 레이저)를 단독으로 강판의 표면을 조사하여 유효한 철 손값을 갖는 변형부를 형성하더라도, 그 변형부에서의 자연부식 전위값은 (-) 700 mV 이하를 나타내고 있어서 부식이 잘 발생할 수 있다.
- [104] 또한 중첩 레이저를 구성하는 제1 레이저(광섬유 레이저)와 단독 광섬유 레이저를 비교하였을 때에 중첩 레이저를 구성하는 제1 레이저(광섬유 레이저)의 출력력을 대략 70% 만으로도 부분 재응고층이 형성될 수 있다.
- [105] 이와 같이 중첩 레이저빔을 조사한 경우에 절연 피막층에 부분 재응고층이 나타나는 이유는 절연 피막을 구성하고 있는 인산염의 기화점이 낮기 때문에 중첩 레이저 조사시 인(Phosphorus)이 먼저 기화되고 Si와 O로 이루어진 규소 산화물들은 비정질 상태로 재응고 되는 것으로 본다. 이와 같이 절연 피막층의 표면에 비정질 상태의 재응고 층이 형성될 경우 비정질 고유 특성에 의하여 부식 특성이 향상되는 것으로 본다.
- [106] 한편 강판의 표면에 중첩 레이저빔(20)을 조사하여 형성된 절연 피막층의 재응고층의 두께는 절연 피막층 평균 단면 두께의 20% 이내인 것이 바람직하다.
- [107] 절연 피막의 재응고층의 두께가 평균 단면 두께의 20% 이상 커지면 절연 피막층의 절대 두께가 얇아지므로 내식성에 불리하게 작용할 수 있으며, 절연 피막층에 의한 장력효과를 감소시켜 철손이 열위할 수 있기 때문에 이와 같은 범위로 제한하는 것이 바람직하다.
- [108] 이상과 같이 절연 피막층에 부분 재응고층이 형성될 경우, 절연 피막층의 물성이 변화하여 절연 피막층이 전체적으로 안정되어 부분적으로 벗겨지고 손상되지 않게 된다. 절연 피막층 두께의 20% 이내 두께 내에서 부분용융층이 형성될 경우, 절연 피막층의 더 큰 손상없이 강판에 레이저의 입사에너지 대비 충분한 레이저를 강판에 부여하고 있다는 반증이 된다.
- [109] 또한 부분 재응고층이 절연 피막층의 전면에 20% 이상 형성된다면 절연 피막층의 손상이 더 확대되어 절연 피막층에 의한 장력효과를 잃어버리기 때문에 바람직하지 않다. 그러나, 절연 피막층에 부분 재응고층이 형성된 경우 레이저에 의한 에너지 흡수율이 충분히 강판에 부여하고 있다고 볼 수 있다.
- [110] 그리고 이상과 같이 중첩 레이저의 조사에 의하여 전기강판에 변형부가 형성되고 강판의 상부 절연 피막층에 부분 재응고층이 형성될 경우, 재응고층 형성에 의하여 절연 피막층에 수축이 발생하여 강판의 변형부가 형성된 절연 피막층의 두께가 변화할 수 있다.
- [111] 이때 강판에 형성되는 변형부 상부의 절연 피막층의 두께는 변형부가 미형성된 영역 상부의 절연 피막층의 두께의 60% 이상인 것이 바람직하다.
- [112] 강판에 형성되는 변형부의 피막층 두께가 60% 이하일 경우, 피막 두께 저하에 따라 내식성 열화 및 장력감소효과로 철손이 열화 될 수 있다.
- [113] 본 발명의 일실시예에서 중첩 레이저빔을 이용하여 열변형에 의한 자구미세화 처리한 이후 강판간의 절연성을 확보하기 위하여 절연 피막이 박리되는 경우 뿐만 아니라 유리 피막이 박리되는 것을 방지한다는 것을 의미한다.

- [114] 한편, 본 발명의 일실시예에 의한 전기강판의 표면에 중첩 레이저를 조사하여 변형부를 형성할 경우 이러한 강판의 W15/50 철손 개선율은 6 % 이상인 것이 바람직하다. W15/50 개선율이 이 보다 낮은 경우 강판의 레이저 흡수율이 낮기 때문에 원하는 철손 저감 효과를 기대하기 어렵다.
- [115] 그리고 본 발명의 일실시예에 의한 전기강판의 표면에 중첩 레이저를 조사하여 변형부를 형성할 경우 이러한 강판의 W17/50 철손 개선율이 9 % 이상 것이 바람직하다. W17/50 철손 개선율이 이 보다 낮을 경우 역시 강판의 레이저 흡수율이 낮기 때문에 원하는 철손 저감 효과를 기대하기 어렵다.
- [116] 이하에서는 본 발명의 일실시예에 따른 방향성 전기강판의 제조 방법 및 자구 미세화 방법에 대하여 자세히 설명한다.
- [117] [냉연강판의 제조]
- [118] 방향성 전기강판을 제조하기 위하여 먼저 전기강판 기재의 슬라브를 제조한다.
- [119] 슬라브의 화학조성 및 금속조직은 자화 용이축이 일정 방향으로 정렬되어 전기강판으로 기능하는 것이면 그 성분과 조직은 별도로 한정하지 아니한다. 다만 예를 들어 설명하면 슬라브의 화학조성은 아래와 같다.
- [120] 질량 %로 C : 0.08 % 이하(0%는 제외한다), Si : 1.0 ~ 6.5 %, Mn: 0.005 ~ 3.0%, (Nb, V, Ti 중 어느 하나 이상의 합계): 0.070% 이하, (Cr, Sn, Sb 중 어느 하나 이상의 합계): 2.5% 이하, Al: 2.0% 이하(0%는 제외한다), (P, S 중 어느 하나 이상의 합계): 0.100%이하(0%는 제외한다), (Cu 와 Sn은 합계): 1.0% 이하, 희토류 및 기타 불순물 총합은 0.2%이하를 포함하고 잔부는 Fe로 이루어 진다.
- [121] (C: 0.08%이하(0%는 제외한다))
- [122] 탄소(C)는 강 중에 불가피하게 혼입되는 원소이나, 자기 시효에 의한 자기 특성을 악화시키므로 적정한 함량으로 제어되는 것이 바람직하다. 강판내에 C의 함량이 너무 적을 경우 제조 공정에서 상변태가 충분히 일어나지 않아서 강판의 미세조직을 불균일화하여 결국 2차 재결정 조직이 불안정해질 수 있고, C가 너무 많이 포함되면 제조공정 중에 탄화물이 조대해지고 석출량이 과도하여 그 결과로 탈탄이 충분히 이루어지지 않아서 Goss 집합 조직의 집적도가 저하되어 2차 재결정 집합조직을 훼손할 수 있다. 따라서 강판의 C 함유량은 0.08%이하, 더 바람직하게는 0.001 ~ 0.040 %를 함유한다.
- [123] (Si:1.0 ~ 6.5 %)
- [124] 규소(Si)는, 방향성 전기강판의 기본 조성으로 강판의 비저항을 증가시켜 철손을 낮추는 역할을 한다. 1.0 % 미만일 경우 비저항이 감소하게 되어 와전류손이 증가하여 철손 특성이 열화되어 Si 첨가 효과를 기대할 수 없고, 6.5 % 이상일 경우, 강판의 취성이 증가하고 인성이 감소하여 압연과정에서 판파단이 발생할 수 있고, 제조공정 중 질화물을 충분히 형성하지 못하여 최종고온소둔 과정에서 2차 재결정 형성에 필요한 충분한 결정립 억제력을 확보할 수 없게 된다. 따라서 Si는 1.0 ~ 6.5 %가 바람직하다.
- [125] (Mn: 0.005 ~ 3.0%)

- [126] 망간(Mn)은, 비저항을 증가시켜 와전류손을 감소시킴으로써 전체 철손을 감소시키는 효과가 있으며, 소강상태에서 S와 반응하여 Mn계 황화물을 만들 뿐만 아니라 Si와 함께 질화처리에 의해서 도입되는 질소와 반응하여 (Al, Si, Mn)N의 석출물을 형성함으로써 1차재결정립의 성장을 억제하여 2차재결정을 일으킬 뿐만 아니라 최종 제품의 표면품질에 영향을 미치는 중요한 원소이다. 그러나 Mn이 너무 적게 포함될 경우 최종 제품의 표면 품질이 나빠질 수 있다. 또한 Mn이 너무 많이 포함될 경우 오스테나이트 상분율이 매우 증가하여 Goss 집합조직이 훼손되고 자속밀도가 감소하며 탈탄소둔시 산화층이 너무 과하게 형성되어 탈탄을 방해할 수 있다. 따라서 Mn은 0.005 ~ 3.0 %가 바람직하다.
- [127] (Nb, V, Ti 중 어느 하나 이상의 합계: 0.05% 이하)
- [128] 니오븀(Nb), 바나듐(V), 티타늄(Ti)은 제조공정 중에 C와 N과 반응하여 석출물을 형성하는 원소이나 너무 많이 첨가할 경우 2차 재결정 소둔 이후에도 강판에 잔존하여 강판의 자기적 특성을 저하시키므로, Nb, V, Ti 중에서 선택된 원소 1종 이상이 합계로 0.05% 이하로 제어하는 것이 바람직하다.
- [129] (Cr, Sn, Sb 중 어느 하나 이상의 합계: 2.5%이하)
- [130] 크롬(Cr)은 Goss 집합조직의 형성을 촉진하여 철손을 저감시킬 목적으로 첨가하고 Sn은 결정립 성장을 억제하여 궁극적으로 자속밀도를 향상시킬 목적으로 첨가한다. 그리고 안타몬(Sb)는 결정립계에 편석하여 결정립의 성장을 억제하여 2차 재결정을 안정화시키는 효과가 있다. 이 들 세 원소는 모두 2차 재결정 조직의 형성과 상호 관계가 있으므로 Sn, Sb, Cr는 합계로 2.5 % 이하로 제어하는 것이 바람직하다.
- [131] (Al: 2.0% 이하(0%는 제외한다))
- [132] 알루미늄(Al)은 제조공정 중에서 석출된 Al계 질화물 이외에 1차 재결정 공정 중에 질화처리에 의하여 도입된 N과 강중에 고용상태로 존재하는 Al, Si, Mn과 결합하여 (Al, Si, Mn)N 및 AlN 형태의 질화물을 형성하여 강한 결정립 성장 억제제로 역할을 한다. 그러나 Al을 너무 많이 포함할 경우 석출물이 불균일하여 2차 재결정의 형성이 불안정하여 강판의 자기적 특성이 저하되므로 2.0 % 이하로 첨가하는 것이 바람직하다.
- [133] (P, S 중 어느 하나 이상의 합계: 0.1% 이하(0%는 제외한다))
- [134] 인(P)은 결정립계에 편석하여 결정립계의 이동을 방해하고 동시에 결정립 성장을 억제하는 보조적인 역할을 하며, S는 너무 많이 첨가되면 2차 재결정 형성을 불안정하게 한다. 또한 P와 S는 전기강판을 제조하는 과정에 불가피하게 첨가되는 원소로서 P, S 합계로 0.1% 이하로 제어하는 것이 바람직하다.
- [135] (Cu + Sn 합계: 0.1% 이하)
- [136] 구리(Cu)는 결정립내 일부 고용됨에 따라 집합조직을 개선하는 역할을 하며, Cu + Sn 합량이 과다하면 결정립계에 편석하여 고온에서 액상을 형성할 수 있기 때문에 Cu와 Sn은 총량으로 0.1% 이하로 제어하는 것이 바람직하다.
- [137] (희토류 및 기타 불순물 총합이 0.2% 이하)

- [138] 본 발명의 일 실시예에 의한 방향성 전기강판은 세륨(Ce)이나 프라세오디뮴(Pr)과 같은 희토류 및 기타 불순물을 포함할 수 있고 어떤 희토류 및 불순물이 포함되더라도 그 중합은 0.2%이하인 것이 바람직하다. 희토류 및 불가피한 불순물은 제강 및 방향성 전기강판의 제조 과정에서 의도적으로 투입되거나 불가피하게 혼입되는 불순물을 의미한다. 불가피한 불순물에 대해서는 널리 알려져 있으므로, 구체적인 설명은 생략한다. 본 발명의 일 실시예에서 전술한 합금 성분 외에 원소의 추가를 배제하는 것은 아니며, 본 발명의 기술 사상을 해치지 않는 범위 내에서 다양하게 포함될 수 있다. 추가 원소를 더 포함하는 경우 잔부인 Fe를 대체하여 포함한다.
- [139] 다음은 상기 조성을 갖는 강판을 연속주조법으로 슬라브를 제조하고 통상적인 방법으로 가열하여 열간압연을 한다. 열간압연 후 필요에 따라 선택적으로 열연 판 소둔을 한 다음 냉간압연을 하여 두께 0.1 ~ 0.5 mm 범위의 냉연 강판을 제조한다. 여기서 냉간압연은 1회 냉간압연 또는 중간소둔을 사이에 두는 2회 이상의 냉간압연을 실시할 수 있다.
- [140] [1차 재결정 소둔]
- [141] 앞서 설명한 냉연 강판을 동시 탈탄질화 또는 탈탄후질화 공정을 통하여 1차 재결정 소둔을 실시한다. 동시 탈탄질화에 의한 1차 재결정 소둔의 경우 소둔 공정 중에 변형된 냉간압연의 조직이 재결정을 포함하여 탈탄소둔하게 된다. 이를 위해 강판은 질소, 수소, 수분이 혼합되어 있는 혼합 가스 분위기에서 탈탄소둔을 실시하게 된다. 그리고 탈탄후 질화의 경우 탈탄 후 암모니아 가스를 사용하여 강판에 질소이온을 도입하는 질화 처리를 실시할 수도 있다.
- [142] 동시 탈탄질화를 할 경우 로내에 장입된 냉연 강판을 700 ~ 900 °C 구간에서 분위기 가스의 이슬점온도를 40~70°C로 하고, 표면의 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4/\text{SiO}_2$ 비가 0.5~3.0으로 제어하여 전기강판의 표면에 산화층을 형성한다.
- [143] [2차 재결정 소둔]
- [144] 그 다음 이러한 전기 강판의 표면에 MgO를 기본으로 하는 소둔분리제를 도포한다. 그리고 소둔분리제가 도포된 강판을 1,000°C 이상으로 승온하여 장시간 균열 소둔하여 2차 재결정을 일으킴으로써 강판의 {110}면이 압연면에 평행하고, <001>방향이 압연방향에 평행한 Goss 방위의 집합조직을 형성하게 된다. 이와 같은 최종 고온소둔 공정에 의하여 강판의 표면에는 포스테라이트가 포함된 유리 피막층을 형성하며 강판의 내부에는 2차 재결정이 형성된다.
- [145] [절연 피막 형성]
- [146] 2차 재결정이 이루어진 강판에 대하여 콜로이달 실리카와 금속인산염의 단독 혹은 복합 절연 코팅액으로 코팅한 다음 소둔하여 유리 피막층이 형성된 전기강판의 표면에 절연 피막층을 형성한다.
- [147] 이러한 절연 피막층을 형성하는 방법은 특별히 제한 없이 사용할 수 있으며, 일 예로, 인산염을 포함하는 절연 코팅액을 도포하는 방식으로 절연 피막층을 형성할 수 있다. 이러한 절연 코팅액은 콜로이달 실리카와 금속인산염을 포함하는 코

팅액을 사용하는 것이 바람직하다. 이 때 금속인산염은 Al 인산염, Mg 인산염, 또는 이들의 조합일 수 있으며, 절연 코팅액의 중량 대비 Al, Mg, 또는 이들의 조합의 함량은 15 중량% 이상일 수 있다.

- [148] [자구 미세화 처리]
- [149] 이상과 같은 공정에 의하여 유리 피막과 절연 피막이 순차적으로 형성된 전기강판의 표면에 제1 레이저(A)와 제2 레이저(B)가 중첩된 레이저 빔(20)을 동시에 조사하여 강판의 표면에 선상의 변형부(10)를 형성한다.
- [150] 이 때 중첩 레이저 빔의 조사 각도나 사용하는 레이저 빔의 품질 그리고 레이저 모드의 종류는 앞서 설명한 바와 같으므로 자세한 설명은 생략한다.
- [151] [자연부식 전위값의 측정]
- [152] 제조된 전기강판의 표면에 중첩 레이저 빔(20)을 조사하여 변형부(10)를 형성한 다음 강판의 일부를 원형으로 절단하여 자연부식 전위값을 측정한다.
- [153] 도 5 과 도 6에는 자연부식 전위값을 측정하는 장치를 나타내고 있다.
- [154] 먼저 자연부식 전위값을 측정하기 위하여, 제조된 전기강판을 두께 0.2mm 또는 0.23 mm이고 지름이 15 mm 가 되도록 절단한다. 이때 절단하는 원형의 시편에 적어도 1 개 이상의 선상의 변형부가 형성되어 있고 이러한 선상의 변형부는 시편의 중앙에 위치하도록 절단한다. 이와 같이 절단된 시편은 통상의 방법으로 연마 및 세척하여 자연부식 전위값을 측정할 수 있게 준비한다.
- [155] 준비된 전위값 측정용 시편(55)은 도 5에 나타낸 바와 같이, 전위값 측정기의 작업전극(50, Working Electrode, WE)의 끝단에 형성된 시편 홀더(51) 내부에 노출 형성된 전극판(56)과 맞 닿게 부착한다. 그리고 이 시편(55)을 밀폐링(54)을 사이에 두고 시편홀더뚜껑(53)을 이용하여 시편 홀더(51)에 고정시킨다. 이 때 측정하는 시편(55)이 전해액과 직접 접촉할 수 있도록 시편홀더뚜껑(53)의 전면에는 개방구(58)가 형성되어 있다. 개방구(58)의 크기는 직경 10 mm이다. 따라서 실제 전위값 측정시 시편(55)의 일면 중 직경 10 mm 정도가 전해액(85)과 직접 접촉을 하게 된다.
- [156] 도 6에는 본 발명의 일실시예에서 사용한 자연부식 전위값 측정기를 나타내고 있다.
- [157] 이러한 측정기는 측정기 본체(40)와 반응조 (80) 그리고 이 반응조에 설치된 작업전극(50, WE), 기준전극(60, Reference Electrode, RE) 그리고 보조전극(70, Counter Electrode, CE)로 이루어 진다. 반응조 (80)는 내부에 담기는 전해액(85)이 일정한 온도를 유지할 수 있도록 정온수 유입구(81)과 유출구(83)가 형성되어 있고, 내부는 밀폐되어 있다.
- [158] 각 전극의 재질은 작업전극(50, WE)의 경우 고밀도 탄소 전극을 사용하고, 기준전극(60, RE)은 카로멜 전극 (Calomel Electrode)을 사용하며, 보조전극(70, CE)은 백금전극을 사용하는 것이 바람직하다.

- [159] 그리고 자연부식 전위값 측정기 본체(40)는 GAMRY INSTRUMENTS사의 Reference 600 모델을 사용하는 것이 바람직하며, 측정 조건은 Voltage Range: $\pm 0.5V$ 와 Scan Rate: $0.333mV/s$ 으로 설정하여 측정하는 것이 바람직하다.
- [160] 자연부식 전위값 측정시 사용한 전해액(85)은 3.5 % NaCl 용액을 사용하고, 전해액(85)은 30 °C 항온으로 유지하며, 시편(55)과 전해액(85)간의 초기 상태를 안정화하기 위하여 시편 설치후 600 초 (10 분)동안 유지한 다음 자연부식 전위값을 측정하는 것이 바람직하다.
- [161] 자연부식 전위값은 측정과 관련하여 기타 다른 조건 및 특징은 KS D 0279, 0238 와 같이 통상의 기술자에게 알려진 개방회로 자연부식 전위 측정법을 참고하여 측정할 수 있다.
- [162] 이하에서는 구체적인 실시예를 통하여 본 발명을 좀더 상세하게 설명한다. 그러나 이러한 실시예는 단지 본 발명을 예시하기 위한 것이며, 본 발명이 여기에 한정되는 것은 아니다.
- [163]
- [164] **실시예**
- [165] 아래 표 1의 조성을 갖는 슬라브를 이용하고 열간압연과 냉간압연하여 0.20 mm와 0.23mm 두께의 냉연강판을 제조하였다. 표 1에서 원소 %는 중량 %를 의미한다.
- [166] [표1]
- | C
(%) | Si
(%) | Mn
(%) | Cr
(%) | Sn
(%) | Sb
(%) | Al
(%) | 잔부 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|
| 0.05 | 3.518 | 0.103 | 0.113 | 0.0699 | 0.019 | 0.003 | Fe |
- [167] 이러한 냉연강판에 대하여 840°C의 온도로 습한 수소와 질소 및 암모니아 혼합 가스 분위기 (이슬점 온도 69°C, Fe_2SiO_4/SiO_2 비는 1.2로 제어하였다) 속에서 150 초간 유지하였고 1차재결정 소둔을 포함한 탈탄소둔과 질화처리를 하였다.
- [168] 1차 재결정 처리된 강판의 표면에 MgO를 포함하는 소둔분리제를 도포하여 최종 고온소둔하였다. 이때 최종 고온소둔은 1,150°C까지 25 부피% 질소 및 75 부피% 수소의 혼합분위기로 하였으며, 1,150°C 도달 후에는 100 부피% 수소분위기에서 8시간 가량 유지후 냉각하였다.
- [169] 이상의 최종 고온소둔 공정에 의하여 2차 재결정 소둔을 완료한 강판의 표면에 콜로이드 실리카 나노입자와 금속 인산염을 혼합한 코팅용액을 도포하고 870 °C 온도 조건에서 55 초간 열처리하여 방향성 전기강판용 절연코팅 층을 형성하였다.
- [170] 그 다음 제1 레이저(광섬유)와 제2 레이저(CO_2)가 중첩된 레이저 빔(20)을 동시에 조사하여 강판의 표면에 선상의 변형부(10)를 형성한다.

- [171] 이 때 강판의 표면에 조사되는 중첩 레이저 빔(20)의 조사 간격을 4.0 ~ 7.0 mm로 변화시키면서 강판의 표면에 압연방향과 교차하는 방향으로 선상의 변형부(10)를 형성하였다.
- [172] 자구미세화에 사용한 레이저는 52 ~ 150W 출력을 갖는 광섬유 레이저를 제1 레이저(A)로 사용하였고, 260 ~ 500 W의 CO₂ 레이저를 제2 레이저(B)로 사용하였다. 이 때 중첩 레이저빔(20)의 주사속도는 0.1 ~ 300 m/s 범위 내에서 속도를 변화시키면서 주사하였고 조사각도는 1° 이하로 하였다.
- [173] 아래 표 2에 0.2 mm 두께의 강판에 대한 시험 조건과 측정된 자성 값을 나타내고 있고, 표 3에서는 0.23 mm 두께의 강판에 대한 시험 조건과 측정된 자성 값을 나타내고 있다.
- [174] 그리고 표2와 표3에서 철손 개선율은 W15/50와 W17/50은 각각 원판 대비 자구 처리한 시편에 대한 철손 개선 비율을 의미한다.
- [175] [표2]

구분	시험 조건				에너지 밀도 (J/m ²)	모강판의 자성			자구미세화후 자성			철손 개선율 (W1 7/50, W15/50)
	조사 방식	Fi ber 출력(W)	C O2 출력(W)	조사 간 격(m m)		W1 5/50	W1 7/50	상대 투 자율	W1 5/50	W1 7/50	상대 투 자율	
실험 1	중첩	30	400	5	0.28	0.539	0.768	19820	0.492	0.695	19250	9.5/8.7
실험 2		52	260	5	0.32	0.539	0.776	19845	0.476	0.666	14582	14.1/11.7
실험 3		92	260	5	0.48	0.548	0.809	15887	0.487	0.696	13076	14.0/11.1
실험 4		100	220	5	0.51	0.539	0.775	18890	0.486	0.676	15153	12.8/9.8
실험 5		150	200	5	0.71	0.535	0.774	19120	0.481	0.679	14525	12.3/10.1

비교 1	순차 중첩	52	260	5	0.32	0.553	0.820	14238	0.529	0.773	13917	5.7/4.2
비교 2	C O2 단독	-	260	5	0.10	0.536	0.775	18650	0.526	0.758	18268	2.1/1.9
비교 3			360	5	0.14	0.529	0.767	18660	0.515	0.713	16238	7.0/2.6
비교 4		-	400	5	0.15	0.526	0.768	18670	0.489	0.701	14238	8.7/7.0
비교 5			460	5	0.17	0.528	0.766	18675	0.495	0.703	14110	8.2/6.3
비교 6			560	5	0.21	0.529	0.768	18665	0.505	0.715	14025	6.9/4.5
비교 7			660	5	0.25	0.527	0.767	18660	0.515	0.730	13875	4.8/2.3
비교 8	Fiber 단독	52	-	5	0.22	0.502	0.734	18703	0.492	0.706	18565	3.8/2.0
비교 9		62		5	0.26	0.521	0.761	18780	0.497	0.703	18580	7.6/4.6
비교 10		72		5	0.30	0.519	0.746	18410	0.490	0.687	17433	7.9/5.6
비교 11		82		5	0.34	0.521	0.751	19949	0.485	0.685	17284	8.8/6.9

비 교 12	96	-	5	0.40	0.521	0.763	20 516	0.489	0.696	16 625	8.8/6.1
비 교 13	150		5	0.63	0.522	0.751	20 066	0.495	0.693	13 999	7.7/5.2

[176] 표 2에서 비교 1의 레이저 조사방식이 “순차 중첩”인 것은 먼저 제 2 레이저(B)인 CO₂레이저를 조사하고 난 다음 일정 시간이 지나서 강판이 상온으로 냉각된 다음, 제 1 레이저(A)인 광섬유 레이저를 순차적으로 조사한 것이다.

[177] [표3]

구 분	시험 조건				에너지 밀도 (J/m m2)	모강판의 자성			자구미세화후 자성			철손 개선율 (W1 7/50, W15/50)
	조 사 방 식	Fi ber 출 력(W)	C O2 출 력(W)	조 사 간 격 (m m)		W1 5/50	W1 7/50	상대 투 자율	W1 5/50	W1 7/50	상대 투 자율	
실 험 6	중 첩	30	4 00	5	0.28	0.572	0.801	19 567	0.535	0.726	18 452	9.4/6.5
실 험 7		52	2 60	4	0.25	0.571	0.804	19 364	0.531	0.732	16 910	9.0/7.0
실 험 8				5	0.32	0.572	0.799	19 276	0.511	0.709	17 366	11.3/ 10.7
실 험 9				6	0.38	0.571	0.801	19 286	0.517	0.705	16 287	12.0/9.5
실 험 1 0				7	0.44	0.570	0.810	19 350	0.527	0.736	16 154	9.1/7.5
실 험		92	2 60	5	0.48	0.571	0.805	19 370	0.508	0.698	16 054	13.3/ 11.0

1 1												
실험 1 2		100	2 30	5	0.51	0.572	0.804	19 365	0.505	0.696	15 956	13.4/ 11.7
실험 1 3		150	2 00	5	0.71	0.572	0.806	19 368	0.503	0.693	15 756	14.0/ 12.1
비 교 1 4	C O2 단 독	-	2 60	5	0.10	0.587	0.813	19 450	0.573	0.787	17 250	3.2/2.4
비 교 1 5			3 60	5	0.14	0.578	0.815	19 554	0.539	0.743	17 100	8.8/6.7
비 교 1 6			4 00	4	0.08	0.575	0.802	19 567	0.558	0.77	18 762	4.0/3.0
비 교 1 7				5	0.10	0.572	0.805	19 685	0.538	0.74	19 012	8.1/5.9
비 교 1 8				6	0.12	0.572	0.808	19 376	0.538	0.741	17 265	8.3/5.9
비 교 1 9				7	0.14	0.575	0.805	18 635	0.542	0.742	15 458	7.8/5.7

비교 20			4 60	5	0.17	0.571	0.805	19 354	0.536	0.736	14 254	8.6/6.1
비교 21			5 60	5	0.21	0.572	0.806	19 452	0.54	0.745	12 354	7.6/5.6
비교 22			6 60	5	0.25	0.571	0.805	19 387	0.538	0.742	11 456	7.8/5.8
비교 23	Fiber 단독	52	-	5	0.22	0.568	0.798	21 547	0.557	0.772	21 410	3.3/1.9
비교 24		62		5	0.26	0.571	0.802	19 575	0.553	0.767	19 025	4.4/3.2
비교 25		72		5	0.30	0.572	0.806	19 565	0.552	0.765	18 957	5.1/3.5
비교 26		82		5	0.34	0.575	0.805	19 454	0.548	0.756	17 898	6.1/4.7
비교 27		96		4	0.32	0.575	0.805	19 321	0.548	0.743	16 693	7.7/4.7
비교				5	0.40	0.572	0.802	19 558	0.542	0.738	16 452	8.0/5.2

2											
8											
비			6	0.48	0.576	0.806	19	0.534	0.736	16	8.7/7.3
교							548			152	
2											
9											
비			7	0.56	0.573	0.804	19	0.542	0.745	15	7.3/5.4
교							654			897	
3											
0											
비	150		5	0.63	0.572	0.801	19	0.554	0.752	15	6.1/3.1
교							875			325	
3											
1											

[178] 제조된 방향성 전기강판에 대하여 자연부식 전위값을 측정하고 아울러 염수 분무 시험을 하였다.

[179] 자연전위 부식값은 제조된 방향성 전기강판의 두께 0.2mm 와 두께 0.23 mm 각각에 대하여 지름이 15 mm 가 되도록 절단한 다음 도 5와 도 6에 나타난 자연부식 전위값 측정기를 이용하여 측정하였다.

[180] 측정된 자연부식 전위값에 대하여 방향성 전기강판의 두께 0.2mm인 시편은 아래 표 4에 그리고 두께 0.23 mm인 시편은 아래 표 5에 각각 나타내고 있다.

[181] 아래 표 4와 표 5에서 나타낸 부식특성은 자연부식 전위값과 염수 분무시험을 근거로 구별한 것이다. 표 4와 표 5에서 “◎” 표시는 자연부식 전위값이 - 200 mV 이상이고 8시간 염수 분무후에도 부식이 발생하지 않았다는 것을 나타낸다. 그리고 “○” 표시는 자연부식 전위값이 - 200 내지 - 350mV이고, 8시간 염수 분무후에도 부식이 발생하기 않은 것을 나타낸다. 또한 “X” 표시는 자연부식 전위값이 - 350 내지 -850mV이고, 8시간 염수 분무후에 부식이 발생한 것을 나타낸다.

[182] 여기서 염수 분무 시험은 KS D 9502의 측정기준에 따라 시험한 것이다.

[183] [표4]

구분	시험 조건				에너지 밀도 (J/mm2)	부식 전위값 mV	부식 육안 관찰
	조사 방식	Fiber 출력 (W)	CO2 출력(W)	조사 간격 (mm)			
실험 14	중첩	30	400	5.0	0.28	-120	◎

실험 15		52	260	5.0	0.32	-140	⊙
실험 16		92	260	5.0	0.48	-160	⊙
실험 17		100	230	5.0	0.51	-200	⊙
실험 18		150	200	5.0	0.71	-345	○
비교 32	순차 중첩	52	260	5.0	0.32	-720	X
비교 33	CO2 단독	-	260	5.0	0.10	-210	○
비교 34			360	5.0	0.14	-660	X
비교 35			400	5.0	0.15	-680	X
비교 36			460	5.0	0.17	-685	X
비교 37			560	5.0	0.21	-670	X
비교 38			660	5.0	0.25	-690	X
비교 39	Fiber 단독	52	-	5.0	0.22	-120	⊙
비교 40		62		5.0	0.26	-740	X
비교 41		72		5.0	0.30	-735	X
비교 42		82		5.0	0.34	-750	X
비교 43		96		5.0	0.40	-800	X

비교 44		150		5.0	0.63	-820	X
----------	--	-----	--	-----	------	------	---

[184] [표5]

구분	시험 조건				에너지 밀도 (J/mm ²)	부식 전위값 mV	부식 육안 관찰
	조사 방식	Fiber 출력 (W)	CO2 출력(W)	조사 간격 (mm)			
실험 19	중첩	30	400	5.0	0.28	-110	⊙
실험 20		52	260	4	0.25	-145	⊙
실험 21		52	260	5	0.32	-158	⊙
실험 22		52	260	6	0.38	-142	⊙
실험 23		52	260	7	0.44	-160	⊙
실험 24		92	260	5.0	0.48	-165	⊙
실험 25		100	230	5.0	0.51	-220	○
실험 26		150	200	5.0	0.71	-340	○
비교 45	CO2 단독	-	260	5	0.10	-205	○
비교 46			360	5.0	0.14	-658	X
비교 47			400	4	0.12	-675	X
비교 48				5	0.15	-685	X
비교 49				6	0.18	-680	X

비교 50				7	0.21	-689	X
비교 51			460	5.0	0.17	-680	X
비교 52			560	5.0	0.21	-695	X
비교 53			660	5.0	0.25	-679	X
비교 54	Fiber 단독	52	-	5.0	0.22	-115	⊙
비교 55		62		5.0	0.26	-725	X
비교 56		72		5.0	0.30	-745	X
비교 57		82		5.0	0.34	-755	X
비교 58		96		4	0.32	-840	X
비교 59		96		5	0.40	-810	X
비교 60				6	0.48	-815	X
비교 61				7	0.56	-830	X
비교 62				150	5.0	0.63	-850

[185] 표 2에서와 같이 강판의 두께가 0.2 mm이고 중첩 레이저의 주사 간격이 5 mm으로 동일한 상태에서 각 레이저의 출력값이 동일한 경우 실험 2에서 알 수 있듯이, 중첩레이저에 의한 철손 개선율은 비교 8의 Fiber 단독 및 비교 2의 CO₂ 단독에 비하여 현저하게 개선되었음을 알 수 있다.

[186] 더 나아가 표 2에서 알 수 있듯이 단독 CO₂레이저의 출력값을 중첩 레이저의 CO₂ 레이저 출력값 (260 W) 보다 400 W로 크게 높인 비교 4의 경우에도 출력값이 작은 실험 1 내지 실험 5의 철손개선율 보다 낮게 나타나고 있다는 것을 알 수

- 있으며, 광섬유 레이저의 출력을 높인 비교 13의 경우에도 실험 1 내지 실험 4의 철손개선을 보다 낮게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.
- [187] 그리고 표 3에서 알 수 있듯이 강판의 두께가 0.23 mm이고 중첩 레이저의 주사 간격을 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm로 변경하여 주사한 경우에도 각 주사 간격 별로 본 발명에 의한 중첩 레이저를 조사한 각 실험예의 경우에 철손 개선율이 많이 개선되었다는 것을 알 수 있다.
- [188] 표 2에서 알 수 있듯이 단독 CO₂인 비교 2내지 비교 7의 경우, 본 발명의 범위 내의 출력(W; 200~500) 임에도 불구하고 철손 개선율이 매우 좋지 않게 나타나지만, 표 4의 비교예 33에서와 같이 부식특성은 조금 있는 것으로 나타났다. 그리고 단독 CO₂인 비교 6과 비교 7의 경우, 본 발명의 출력 값이 벗어나지만 (W 500 이상) 철손 개선율도 낮고 표 4의 비교 37과 비교 38에서와 같이 부식특성 또한 매우 좋지 않게 나타나고 있다.
- [189] 또한 표 2에서 단독 Fiber인 비교 9 내지 비교 13의 경우, 본 발명의 범위 내의 출력(W; 10~150)의 경우 철손 개선율도 매우 좋지 않게 나타나고, 표 4의 비교 40 내지 비교 44에서와 같이 부식특성 또한 좋지 않게 나타나고 있다.
- [190] 다만 예외적으로 표 2의 단독 Fiber의 출력이 52 W로 낮은 비교 8의 경우 철손 개선율이 현저히 낮지만, 표 4의 비교 39에서와 같이 부식특성은 양호하게 나타나고 있다.
- [191] 이러한 경향은 강판 두께 0.23 mm의 실험 결과인 표 3에서도, 단독 CO₂와 단독 Fiber인 경우에는 표 5에서와 같이 유사한 결과를 나타내고 있다.
- [192] 그리고 표 2에서 이중 레이저를 순차 중첩한 비교 1의 경우 철손 개선율이 좋지 않게 나타나고 있다.
- [193] 한편 표 4와 표 5에서 알 수 있듯이, 자연부식 전위값을 측정한 결과를 보면, 전기강판의 두께가 0.20 mm나 0.23mm 모두 아래와 같은 특성이 나타남을 알 수 있다.
- [194] 즉, CO₂ 레이저를 단독으로 조사한 경우, 철손 개선율이 비교적 높게 나타나는 400W 이상의 출력으로 높일 경우, 측정된 자연부식 전위값은 -650 mV 이하로 낮게 나타나서 부식 특성이 좋지 않다는 것을 알 수 있다.
- [195] 또한 Fiber 레이저를 단독으로 조사한 경우, 철손 개선율을 어느 정도 확보가 가능한 출력인 72 W 이상으로 증가할 경우 자연부식 전위값은 -700 mV 이하로 낮게 나타나서 이 역시 부식 특성이 좋지 않다는 것을 알 수 있다.
- [196] 그러나 Fiber 레이저와 CO₂ 레이저를 중첩하여 조사한 경우, 철손 개선율을 충분히 확보할 수 있을 뿐만 아니라 자연부식 전위값이 충분히 확보되어 부식 특성 또한 우수하다는 것을 알 수 있다.
- [197] 이러한 결과에 더하여 Fiber 레이저를 단독으로 조사한 비교 39와 비교 54 경우에, 자연부식 전위값이 -120mV 이상으로 나타나고 있어서 부식에 대한 저항성이

높아 졌다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 CO₂를 260 W 출력에서 단독으로 레이저를 조사한 비교 33과 비교 45에서도 알 수 있다.

- [198] 본 발명은 실시예들에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 제조될 수 있으며, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다.

청구범위

- [청구항 1] 제1 파장의 제1 레이저 빔이 조사되어 형성되고 있는 제1 빔스팟과 제2 파장의 제2 레이저 빔이 조사되어 형성되고 있는 제2 빔스팟으로 이루어지고
상기 제1 빔스팟이 상기 제2 빔스팟의 내부에 일부 또는 전부가 위치하도록 제어되어 형성되고 있는 중첩 레이저빔을
전기강판의 표면에 조사하여 변형부를 형성하는, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 2] 제1항에 있어서,
상기 중첩 레이저빔의 제1 레이저는 단파장 레이저이고 제2 레이저는 상기 단파장 레이저의 파장 보다 긴 파장의 장파장 레이저인, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 3] 제2항에 있어서,
상기 제1 레이저와 상기 제2 레이저를 동시에 중첩한 상기 중첩 레이저빔을 2차 재결정이 이루어진 상기 전기강판의 표면에 압연방향의 직각 또는 경사진 방향으로 조사하여 선상의 변형부를 형성하는, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 4] 제2항에 있어서,
상기 제1 레이저 또는 상기 제2 레이저의 빔 형상은 타원형 또는 원형 중 어느 하나인, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 5] 제2항에 있어서,
상기 제1 레이저는 광섬유 레이저, YAG 레이저 또는 디스크 레이저 중 어느 하나이고, 상기 제2 레이저는 CO₂ 레이저인, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 6] 제5항에 있어서,
상기 제1 레이저인 광섬유 레이저의 빔 스팟은 폭이 10 내지 200 μm 이고, 길이는 상기 CO₂ 레이저 빔 스팟의 길이 이하 또는 그 이상의 타원형 또는 원형인, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 7] 제5항에 있어서,
상기 제2 레이저인 CO₂ 레이저의 빔 스팟은 폭이 100 내지 400 μm 이고, 길이는 0.4 내지 20 mm 인 타원형 빔 스팟인, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 8] 제1항에 있어서,
상기 중첩 레이저빔의 조사 간격은 2 ~ 10 mm이고, 주사 속도는 0.1 내지 300 m/sec인, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 9] 제3항에 있어서,

- 상기 중첩 레이저 빔의 경사 방향은 $\pm 10^\circ$ 이하인, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 10] 제5항에 있어서,
상기 제1 레이저인 광섬유 레이저의 출력은 10 내지 150 W이고, 상기 YAG 레이저의 출력은 10 내지 250 W이며, 상기 제2 레이저인 CO₂ 레이저의 출력은 200 내지 500 W 인, 방향성 전기강판의 자구 미세화 방법.
- [청구항 11] 전기강판 기재; 와
상기 전기강판 기재 상에 위치하는 절연 피막층을 포함하고,
상기 전기강판 기재의 표면에 하나 이상의 선형의 변형부가 형성되고 상기 전기강판의 자연부식 전위값이 (-) 350 mV 이상인, 방향성 전기강판.
- [청구항 12] 제11항에 있어서,
상기 전기강판 기재와 상기 절연 피막층 사이에 유리 피막층이 형성된, 방향성 전기강판.
- [청구항 13] 제11항에 있어서,
상기 전기강판의 자연부식 전위값이 (-) 50 내지 (-) 300 mV 인, 방향성 전기강판.
- [청구항 14] 제11항에 있어서,
상기 절연 피막층의 표면에 재응고층이 형성되어 있는, 방향성 전기강판.
- [청구항 15] 제14항에 있어서,
상기 재응고층의 두께는 상기 절연 피막층 단면 두께의 20% 이내인, 방향성 전기강판.
- [청구항 16] 제11항에 있어서,
상기 전기강판의 W15/50 절손 개선율이 6 % 이상인, 방향성 전기강판.
- [청구항 17] 제11항에 있어서,
상기 전기강판의 W17/50 절손 개선율이 9 % 이상인, 방향성 전기강판.
- [청구항 18] 전기강판 기재; 와
상기 전기강판 기재 상에 위치하는 절연 피막층을 포함하고,
상기 전기강판의 표면에 하나 이상의 선형의 변형부가 형성되고, 상기 선형의 변형부 상부의 상기 절연 피막층 표면에 재응고층이 형성되어 있는 방향성 전기강판.
- [청구항 19] 제18항에 있어서,
상기 전기강판 기재와 상기 절연 피막층 사이에 유리 피막층이 형성된, 방향성 전기강판.
- [청구항 20] 제18항에 있어서,
상기 변형부 상부의 상기 절연 피막층의 두께는 변형부가 미형성된 영역 상부의 절연 피막층의 두께의 60% 이상인, 방향성 전기강판.
- [청구항 21] 제18항에 있어서,

상기 재응고층은 규소 산화물을 주성분으로 하고, 상기 절연 피막층은 인 산염 또는 콜로이달 실리카를 주성분으로 하는, 방향성 전기장판.

[청구항 22] 제18항에 있어서,
상기 재응고층의 두께는 상기 절연 피막층 단면 두께의 20% 이내인 방향성 전기장판.