



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2014-0141700  
(43) 공개일자 2014년12월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

B23K 20/12 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-7030408

(22) 출원일자(국제) 2013년03월29일

심사청구일자 없음

(85) 번역문제출일자 2014년10월29일

(86) 국제출원번호 PCT/US2013/034671

(87) 국제공개번호 WO 2013/149184

국제공개일자 2013년10월03일

(30) 우선권주장

61/618,266 2012년03월30일 미국(US)

61/769,920 2013년02월27일 미국(US)

(71) 출원인

브라이엄 영 유니버시티

미국 84602 유타주 프로보 3760 에이치비엘엘 테  
크놀로지 트랜스퍼 오피스

(72) 발명자

로스, 케니스 알렉

미국 아이엔 46545, 미사와카, 307-2디 런어웨이  
베이 씨클

소렌슨, 칼, 디.

미국 유타 84604, 프로보, 286 이. 4840 엔.

(74) 대리인

윤동열

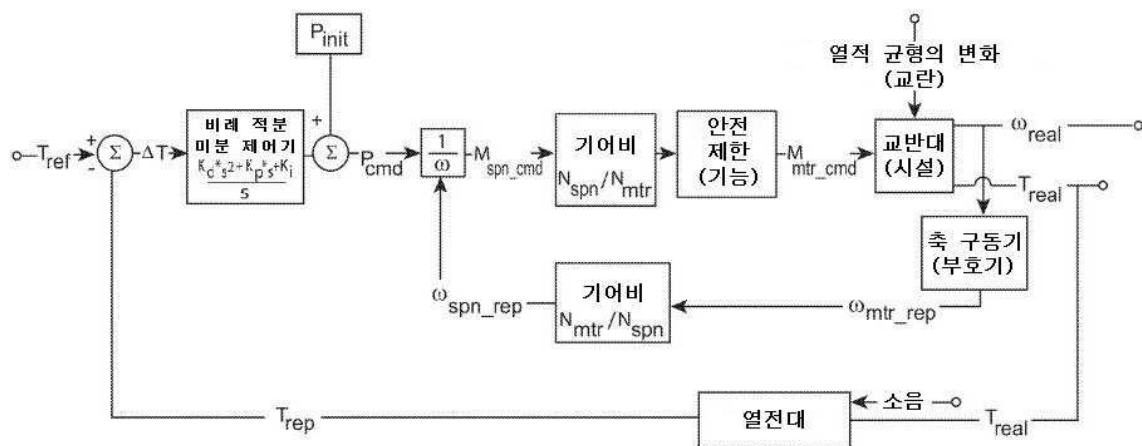
전체 청구항 수 : 총 17 항

(54) 발명의 명칭 **마찰 교반 작업의 처리 제어를 위한 작용력 조정**

(57) 요약

능동적 제어기(610)의 다단계 내포 제어 루프(도 15)를 이용하는 축 구동기(710)로부터 마찰 교반 작업 동안 마찰 교반대에 일정한 전력을 제공하기까지의 출력 작용력(output effort)을 조정하기 위한 시스템(도 6a 또는 도 6b) 및 방법이다. 일정한 전력을 제공하는 것은 마찰 교반대에서의 온도 제어를 용이하게 하며, 용접과 같은 마찰 교반 작업의 결과를 향상시킨다.

**대표도** - 도15



## 특허청구의 범위

### 청구항 1

마찰 교반대의 온도를 제어하도록 능동적 제어를 사용하기 위한 방법으로서,

상기 방법은:

마찰 교반 도구의 작업을 제어하기 위한 능동적 제어를 제공하는 단계; 및

마찰 교반대의 온도를 제어하기 위해 상기 능동적 제어를 사용하여 상기 마찰 교반 도구에 의해 상기 마찰 교반대에 제공되는 전력을 제어하는 단계를 포함하고, 상기 마찰 교반대에 제공된 전력은 상기 마찰 교반 도구를 구동하기 위해 사용되는 축 구동기의 출력 작용력(output effort)을 조정함으로써 제어되는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 2

제1항에 있어서, 상기 마찰 교반대에 제공된 전력을 제어하는 단계는 목표 전력의 입력 수준 유지를 위해 상기 능동적 제어를 사용하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 3

제2항에 있어서, 마찰 교반대로의 전력 입력 수준을 유지하기 위한 상기 능동적 제어를 사용하는 단계는 다단계 내포 제어 루프(multi-stage nested control loop)를 실행하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 4

제3항에 있어서, 상기 다단계 내포 제어 루프를 실행하는 단계는:

1) 축 구동기의 출력 작용력을 제어하는 과정을 통해서 목표 전력 입력 수준의 유지를 위한 내부 제어 루프를 실행하는 단계; 및

2) 상기 마찰 교반대를 위한 목표 온도의 유지를 위해 제공된 전력을 조정하는 외부 제어 루프를 실행하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 5

제4항에 있어서, 상기 축 구동기의 출력 작용력을 제어하는 과정은 상기 축 구동기의 입력 유동의 제어 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 6

제4항에 있어서, 상기 축 구동기의 출력 작용력을 제어하는 과정은 목표 작용력 수준을 유지하는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 7

제4항에 있어서, 상기 축 구동기의 출력 작용력을 제어하는 과정은 상기 축 구동기의 제어를 안정화시키는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 8

제7항에 있어서, 상기 축 구동기의 제어를 안정화시키는 과정은 축 유동 피드백을 사용하는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

### 청구항 9

제8항에 있어서, 상기 축 구동기의 출력 작용력을 제어하는 과정을 통한 목표 전력 입력 수준의 유지는 축 유동

의 감소에 대하여 상기 축 구동기의 출력 작용력의 증가를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

#### 청구항 10

제8항에 있어서, 상기 축 구동기의 출력 작용력을 제어하는 과정을 통한 목표 전력 입력 수준의 유지는 축 유동의 증가에 대하여 상기 축 구동기의 출력 작용력의 감소를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

#### 청구항 11

제1항에 있어서, 상기 마찰 교반 도구는 용접 도구인 것을 특징으로 하는 방법.

#### 청구항 12

마찰 교반 작업중에 마찰 교반대에 제공되는 전력을 제어하기 위한 마찰 교반 시스템으로서,

상기 마찰 교반 시스템은:

마찰 교반 도구;

상기 마찰 교반 도구에 결합된 축;

상기 축에 결합되어 상기 마찰 교반 도구를 회전하게 하는 축 구동기;

상기 마찰 교반 도구의 작업을 제어하기 위한 능동적 제어를 포함하고,

상기 능동적 제어기는 상기 마찰 교반대에 제공된 전력을 제어하도록 상기 마찰 교반 도구를 구동하기 위해 이용되는 축 구동기의 출력 작용력을 조정하는 것을 특징으로 하는 마찰 교반 시스템.

#### 청구항 13

제12항에 있어서, 상기 능동적 제어기는 축 유동 피드백을 받기 위한 수단을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

#### 청구항 14

제12항에 있어서, 상기 능동적 제어기는 상기 마찰 교반대에 대한 목표 온도에 접근하고 유지할 수 있도록 구성된 것을 특징으로 하는 시스템.

#### 청구항 15

제12항에 있어서, 상기 능동적 제어기는 다단계 내포 제어 루프(multi-stage nested control loop)를 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

#### 청구항 16

제12항에 있어서, 상기 마찰 교반 도구는 용접 도구인 것을 특징으로 하는 시스템.

#### 청구항 17

제15항에 있어서, 상기 다단계 내포 제어 루프는 축 구동기 작용력의 제어를 통한 목표 전력 입력 수준을 유지하도록 구성된 내부 제어 루프, 및 상기 마찰 교반대에서의 목표 온도를 유지하기 위해, 제공된 전력을 조정하는 외부 제어 루프를 포함하는 것을 특징으로 하는 시스템.

### 명세서

### 기술분야

본 출원은, 전체 내용이 본 명세서에 참조 문헌으로 병합된 미국 임시 특허 출원 제61/618,266호(출원일: 2012년 3월 30일, 발명자: Kenneth Alec Ross 및 Carl D. Sorensen, 발명의 명칭: "TORQUE MODULATION FOR PROCESS CONTROL OF FRICTION STIR PROCESSING") 및 제 61/769,920호(출원일: 2013년 2월 27일, 발명자: Kenneth Alec Ross, 발명의 명칭: "EFFORT MODULATION FOR PROCESS CONTROL OF FRICTION STIR PROCESSING")의 계속출원으로서 이의 우선권을 주장한다.

[0001]

## 배경 기술

- [0002] **본 발명의 분야:** 본 발명은 일반적으로 마찰 교반 용접(friction stir welding, FSW), 마찰 교반 처리(friction stir processing, FSP), 마찰 교반 혼합(friction stir mixing, FSM), 마찰 표면작업(friction surfacing), 마찰 수력 기둥 처리(friction hydro pillar processing), 마찰 교반 성형(friction stir forming), 마찰 압출(friction extrusion), 및 마찰 교반점 용접(friction stir spot welding, FSSW)(및 본 명세서에서는 총괄하여 "마찰 교반 작업(friction stir operations)"으로 일컬어진다)과 같은 마찰 교반 작업(friction stir operations)에 관련되어 있다. 더욱 세부적으로는, 본 발명은 마찰 교반 작업의 제어를 향상시키기 위해 작용력(effort, 예를 들어 토크(torque))의 제어를 활용하는 제어 알고리즘의 사용에 관련이 있다.
- [0003] **관련분야에 대한 서술:** 마찰 교반 용접은 금속과 금속합금의 용접을 위해 발전되어 온 기술이다. 마찰 교반 용접(FSW) 처리는 흔히 교반 핀(stir pin)을 회전함으로써 접합부위의 각각의 측면에서 두 개의 인접한 소재의 원료를 맞물리게 하는 것을 포함한다. 핀과 소재가 혼합되는 것을 촉진시키기 위한 힘이 가해지고, 핀, 숄더(shoulder) 그리고 소재 사이의 상호작용에 의해 발생한 마찰열의 결과로 접합부위 각각의 측면에서는 원료의 가소화가 이루어진다. 핀과 숄더의 조합 또는 "마찰 교반 용접 팁(FSW tip)"은 접합부위, 전진함에 따라 가소화시키는 원료, 및 용접의 형성을 위해 전진하는 마찰 교반 용접 팁 냉각기(FSW tip cools)를 따라가는 가소화된 원료를 따라 횡단된다. 마찰 교반 용접(FSW)은 또한 핀이 없고 마찰 교반 처리(FSP)를 통해 다른 원료의 처리를 위한 숄더만 있는 도구가 될 수 있다.
- [0004] 도 1은 일반적으로 기둥(shank, 8), 숄더(12) 및 숄더에서 바깥으로 연장된 핀(14)이 있는 원통형 도구(10)로 특징지어지는 마찰 교반 용접에 사용되는 도구의 사시도이다. 핀(14)은 충분한 열이 생성될 때까지 소재(16)에 대하여 회전이 되며, 도구 핀의 끝 부분은 가소화된 소재의 원료를 향하여 낙하한다. 전형적으로, 핀(14)은 더 이상의 소재의 관통을 차단하고 있는 숄더(12)에 도달할 때까지 소재(16)를 향하여 낙하한다. 소재(16)는 때때로 접합부위선(18)에 맞붙어 있는 두 개의 시트 또는 원료판이다. 이러한 예에서, 핀(14)은 접합부위선(18)에서 소재(16)를 향하여 낙하한다.
- [0005] 도 2는 전형적 도구(10)의 단면도이나, 전형적인 도구로만 제한되는 것으로 여겨져서는 안 된다. 마찰 교반 용접(FSW) 팁은 숄더(12)와 핀(14)으로 구성되어 있다는 점에서 칼라(22)는 기둥(8)과 마찰 교반 용접(FSW) 팁(24)을 파지하고 있는 것으로 나타난다. 도구(10)가 회전함에 따라, 토크(예를 들어 작용력(effort))는 회전하는 기둥(8)에서 칼라(22)까지 전송되며 그 다음으로 마찰 교반 용접(FSW) 팁(24)까지 전송된다.
- [0006] 도 1을 참조하면, 소재(16)원료에 대한 핀(14)의 회전운동에 의해 생성된 회전마찰열은 용해점에 도달하지 않아도 소재원료를 유화되게 한다. 도구(10)가 접합부위선(18)을 따라 횡으로 이동함으로써, 가소화된 원료의 핀(14) 주변을 따라 전면부에서 후면부까지의 유동에 따른 용접점을 생성한다. 다른 기존의 기술을 이용한 용접과는 대조적으로, 결과물은 일반적으로 소재(16)원료 자체에서는 구별할 수 없는 접합부위선(18)의 고상접합(20)이다. 또한, 고상접합(20)은 원료의 혼합이 일어남으로 인해 원래의 소재(16)원료보다 우수할 수 있다. 더욱이, 소재원료가 다른 원료들로 구성된다면, 혼합된 원료의 결과물 또한 두 개의 원래의 소재원료 중 어느 것보다도 우수할 수 있다.
- [0007] 숄더(12)가 소재의 표면과 접촉하고 있을 때, 숄더의 회전이 삽입된 핀(14) 주변에 있는 원료의 큰 원통형 기둥을 가소화시키는 부가적인 마찰열을 생성하는 것이 관찰된다. 숄더(12)는 회전하는 도구핀(14)에 의해 유발된 상향의 금속유동을 포함하는 단조력을 제공한다.
- [0008] 마찰 교반 용접을 하는 동안, 도구가 용접부위의 목표 길이만큼 횡단을 하도록, 용접이 되어야 하는 구역과 도구(10)는 서로에 대하여 이동한다. 회전하는 마찰 교반 용접 도구(10)는 반복적인 열간 가공 작업, 금속을 핀(14)의 전면부에서 핀(14)의 후면부로 이동시키는 동안 금속이 소재(16)원료를 따라서 횡으로 이동함에 따라 협소한 구역 안에서의 금속의 가소화를 제공한다. 용접부가 냉각됨에 따라, 도구(10)가 통과함에 따르는 어떤 액체도 생성되지 않으므로 전형적으로 응고가 일어나지 않는다. 흔하지만, 항상 있지는 않은, 용접의 결과물은 결함이 없고, 재결정이 되고, 용접부 안에서 세립의 미세구조를 형성한다.
- [0009] 마찰 교반 도구의 운송 속력은 수행되고 있는 마찰 교반 작업의 세부적 타입, 적용 및 처리 중인 원료에 따라 변한다. 운송 속력의 몇몇 예들은 분당 1미터(1m/min)가 넘으며 회전율은 200 내지 3000 RPM에 이른다. 이러한 비율은 단지 예를 든 것이며, 본 발명의 작업을 제한하는 것으로 여겨져서는 안 된다. 도달한 온도는 대개 고상선 온도에 가깝지만 고상선 온도보다는 낮다. 마찰 교반 용접 파라미터는 원료의 열적 성질을 나타내는 기능을 하며, 고온의 유동 강도 및 침투 깊이이다.

- [0010] 마찰 교반 용접은 1) 충전제 금속이 없고, 2) 처리과정이 완전히 자동화되어 상대적으로 낮은 작업자의 기술 수준을 요구하며, 3) 모든 발열이 도구/소재의 인터페이스에서 발생하므로 에너지의 투입이 효율적이고, 4) 마찰 교반 용접(FSW)의 고체 상태로서의 특성과 극단적인 반복성 때문에 용접후에 필요로 하는 검사가 최소이며, 5) 마찰 교반 용접(FSW)은 인터페이스 차이에 내성이 있어서, 사전 용접 준비가 거의 필요 없고, 6) 전형적으로 제거해야 할 용접 스파터(splatter)가 없으며, 7) 용접 후 표면 마감처리는 거의/전혀 반짝이지 않으면서 예외적으로 매끄러울 수 있고, 8) 보통 다공성 및 산소 오염이 없으며, 9) 주변 원료의 뒤튐림이 거의 또는 전혀 없고, 10) 어떠한 해로운 방출이 없으므로 작업자 보호가 필요 없으며, 11) 용접의 성질이 흔히 향상되기 때문에 용접 이상의 몇몇 장점이 있다. 본 명세서 전체에 걸쳐서, 마찰 교반 작업은 마찰 교반 용접, 마찰 교반 처리, 마찰 교반점 용접과 마찰 교반 혼합을 포함하는 마찰 교반 도구를 사용하여 수행될 수 있는 모든 과정을 포함할 것으로 여겨질 것이지만 여기에 있는 마찰 교반 도구들에만 제한되지는 않는다.
- [0011] 마찰 교반 용접 안에서, 처리 영역 또는 마찰 교반 영역의 온도는 용접 결과물의 성질에 영향을 주고, PCBN(다결정 입방 붕소 질화물, polycrystalline cubic boron nitride) 도구와 같은 도구의 수명에 극적인 영향을 준다. 이러한 도구의 예는 마찰 교반 용접의 온도를 제한하는 것으로 여겨져서는 안된다. 용접 온도를 제어하기 위한 파라미터 변경과정은 능동적 제어 시스템이 바람직하다.
- [0012] 용접부의 길이에 걸쳐서 용접 온도를 제어하는 것은 중요한 일인데, 파괴 인성(fracture toughness) 및 내식성(corrosion resistance)과 같은 용접부의 특성이 용접온도에 따라 다르기 때문이다. 만일 용접 전반에 걸쳐서 명시된 특성이 요구된다면, 용접부의 길이에 걸친 용접 온도는 조정 가능해야 하고 제어되어야 한다.
- [0013] 다결정 입방 붕소 질화물(PCBN) 도구의 짧은 수명은 강철 및 다른 높은 유화 온도(또는 높은 용융 온도)를 갖는 원료에 마찰 교반 처리(FSP)를 적용하는 것을 제한한다. 도구의 온도를 제어하는 것은 PCBN 도구의 수명을 증가시킬 수 있어야 하는데, 일부 온도 문제가 손상을 일으킬 수 있기 때문이다. 예를 들어, 온도가 너무 낮으면, 도구에는 도구의 온도가 감소함에 따라 증가하는 힘에 의한 과도한 압력이 가해진다. 대조적으로, 도구의 온도가 너무 높으면, PCBN 도구는 화학적 마모 때문에 빨리 고장날 것이다. 높은 온도는 또한 회전을 위한 PCBN을 삽입하게 하는 잠금칼라(locking collar) 안에서의 크리프(creep)를 유발할 수 있다. 그렇게 되면, 냉각중에 있는 삽입부의 구석에 지점응력(point stress)이 존재할 수 있으며, 균열 및 고장을 유발할 수 있다.
- [0014] 용접 온도의 제어를 위한 첫번째 작용력(efforts)으로서 수동적 제어 기술이 이용되었다. 연구가들은 용접 온도는 용접피치(weld pitch, 축 속력(spindle speed)/운송 속력(travel speed)) 또는 축 속력과 운송 속력의 기능인 다양한 "허위 열 지수(pseudo heat indexes)"에 비례하였다는 것을 고려하였다. 수동적 제어 기술은 본 처리 과정은 자기 제한적인 평형상태에 도달하였다는 것을 가정한다.
- [0015] 수동적 제어 기술은 평형상태가 용접점의 길이에 따라 존재하지 않을 수도 있기 때문에 온도 제어에는 적합하지 않다. 용접점 길이에 따른 온도변화의 원인은 다음의 내용을 포함한다: 도구 또는 뒷받침판(backing plate)의 부적절한 냉각; 열 경계 상태 안에서의 변화; 및 평형상태에 도달하는 데 있어서 불충분한 시간을 포함한다. 수동적 제어 기술은 다양하지 않는데, 수동적 제어 기술이 처리 교란에 대한 조정을 하지 않기 때문이다.
- [0016] 도 3은 마찰 교반 용접기를 위한 능동적 제어 시스템의 블록 도표이다. 마찰 교반 용접기는 축에 결합되어 있는 마찰 교반 용접 도구를 포함하며, 축은 축 전동기(spindle motor)에 차례대로 결합되어 있다. 마찰 교반 용접기는 또한 조임(clamping)이나 소재가 마찰 교반 용접이 되도록 지지하기 위한 표면을 포함한다. 마찰 교반 용접기는 능동적 제어 시스템에 의해 제어될 수 있어서, 이에 따르는 마찰 교반 용접을 수행한다.
- [0017] 도 4는 종래의 기술을 나타내며, 또한 전력을 일정하게 유지하기 위해 축 속력(spindle speed)을 제어하는 내부 루프(inner loop)와 용접온도에 근거하여 목표하는 전력을 설정하기 위한 외부루프(outer loop) 포함하는 2단계의 제어 모델을 설명한다. 도 4는 도 3의 내부루프를 근접해서 나타내는 블록 도표이다.
- [0018] 도 3은 T가 온도이고,  $\omega$ 가 축 속력, M이 토크이고 P가 전력인 온도 제어 알고리즘을 나타낸다.
- [0019] 도 5가 도 3과 도 4로부터의 교반대 근접도의 블록 도표로써 제공된다. 장치는 축 전동기와 교반대의 조합이다. 외부루프를 위한 참조는 목표 온도이며, 제어되는 변수는 온도이고 조작되는 변수는 전력이다. 내부루프를 위한 참조는 지시된 전력이며 제어되는 변수는 전력이다.
- [0020] 도 3에 나타난 종래의 기술은 내부루프가 전력을 일정하게 유지시키기 위해서 축 속력을 조정하는 것에 대해 설명한다. 종래의 기술의 이러한 측면을 이해하기 위해서는 본 발명이 중요하다. 내부루프의 목적은 교반대에 제공되는 전력의 목표치를 유지하는 것이다.



[0021] 전력과 축 속력의 관계는 다음과 같이 주어진다:

[0022] 
$$P = \omega M \text{ 방정식(1)}$$

[0023] P가 전력,  $\omega$ 가 초당 이동하는 라디안(radians/s)으로 나타나는 축 속력이며 M은 토크이다. 요구되는 목표 전력을 생산하기 위한 축의 속력 문제에 대한 해법으로, 축 속력을 조정함으로써 하는 전력의 제어는 토크 피드백(torque feedback)과 방정식(1)을 이용한다. 축 속력을 조정함으로써 행해지는 전력의 제어를 위한 블록 도표는 도 4에 나타나 있다. 도 4에서 M(여과됨)은 보고된 토크의 여과된 값이다. 이러한 제어 개요는 각각의 PLC 시간 단계 동안에 토크가 일정하다고 가정한다. 회전 제한(slew limits)은 축의 최대 가속도를 규정한다. 회전 제한은 토크 피드백에서의 소음으로 인해 시스템이 불안정하게 되는 것을 방지할 때 사용된다. 만일 회전 제한이 너무 높게 설정되어 있으면, 시스템은 토크 피드백에서 소음을 증폭시키며 불안정하게 된다.

[0024] 0.83RPM/s로의 회전 비율(slew rate)로 축 속력을 조절함으로써 행해지는 전력 제어의 결과는 도 6에 나타나 있다. 전력 제어가 허용되었을 때, 토크는 높고 RPM은 낮다. 용접이 진행됨에 따라 판은 토크를 감소하게 하면서 가열되고 용화된다. 토크가 감소함에 따라, RPM은 증가하고, 그에 따라 일정한 전력을 유지한다. 용접 전반에 걸친 전력의 지속에서 나타나는 큰 스파이크(spikes)는 나타난 대로이다. 전력 스파이크(power spike)는 축 전동기가 지시된 RPM을 달성하기 위해 순간적으로 축을 가속시키려고 시도하기 때문에 발생한다. 전력의 제어를 위해 축 속력을 조정하는 것은 용접 전반에 걸쳐서 큰 전력 스파이크를 초래한다. 이러한 전력 스파이크의 평균은 목표 전력치이다.

[0025] 전력을 제어하기 위해 축 속력을 사용하지 않는 종래의 기술을 넘어서는 향상된 능동적 제어 시스템을 제공하는 것은 이익이 될 것이다.

### 발명의 내용

[0026] 본 발명은 마찰 교반 작업 동안에 마찰 교반부에 일정한 전력을 제공하기 위해 축 구동기(spindle driver)로부터의 작용력을 조정하고 마찰 교반대 안에서의 온도의 제어 및 이에 따른 용접 또는 다른 마찰 교반 작업의 결과를 향상시키기 위한 시스템 및 방법이다. 특정한 몇몇 실시예에서, 유동 변수 피드백(flow variable feedback)에 대응하여 작용력 변수(effort variable)를 조정함으로써 지시 또는 요구된 전력이 획득된다. 유동 변수 피드백은 측정되거나 추정될 수 있다.

[0027] 더욱이, 본 명세서에 공개된 바와 같이, 마찰 교반 작업 동안에 마찰 교반점에 제공되는 전력의 제어를 위한 마찰 교반 시스템은 마찰 교반 도구, 마찰 교반 도구에 결합되어 있는 축, 축에 결합되어서 마찰 교반 도구가 회전하게 하는 축 구동기, 마찰 교반 도구의 제어 작업을 위한 능동적 제어기를 포함할 수 있다. 능동적 제어기는 마찰 교반 도구를 구동하는데 이용되는 축 구동기의 출력되는 작용력을 조정하여 마찰 교반점에 제공되는 전력을 제어한다.

[0028] 마찰 교반 작업 동안의 용접 온도를 제어하기 위한 능동적인 제어기에 대응하는 방법은, 마찰 교반 도구의 작업 제어를 위한 능동적 제어기를 제공하는 것, 마찰 교반대의 온도 제어를 위한 능동적인 제어기를 이용하면서 마찰 교반 도구에 의한 마찰 교반대로의 전력 입력을 제어하는 것을 포함한다. 마찰 교반대로의 전력 입력은, 마찰 교반 도구를 구동하는데 이용되는 축 구동기의 출력 작용력을 조정함으로써 제어된다.

[0029] 첨부된 도면과 함께 다음의 세부적인 서술을 고려한다면, 이러한 및 다른 물체, 특징, 장점과 본 발명의 대안적 측면은 본 발명의 분야에 통상의 기술이 있는 자에게는 분명하게 될 것이다.

### 도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 마찰 교반 용접을 위한 종래의 기술에서 설명한 대로, 도구의 사시도이고;

도 2는 종래 기술로부터의 잠금 칼라와 기둥이 있는 마찰 교반 용접(FSW) 팁의 절개도이며;

도 3은 종래 기술에서 설명한 대로, 온도 조절을 위한 능동적 제어 시스템의 단순화된 블록 도표이고;

도 4는 도 3에서 설명한 대로, 축 속력 전력 제어 시스템을 위한 블록 도표이며;

도 5는 종래 기술의 제어 모델 시설의 근접도를 위한 블록 도표이고;

도 6a와 도 6b는 작용력 조절을 통해서 전력 제어를 설명하는 시스템 블록 도표이며;

- 도 6c는 축 속력을 조정하여 전력의 제어를 나타내는 그래프이고;
- 도 7은 전력과 온도 변화를 포함하는 일정한 축 속력의 용접을 나타내며;
- 도 8은 능동적 제어기의 내부루프의 블록 도표이고;
- 도 9는 토크(예를 들어 작용력)가 전력을 일정하게 유지시키도록 조정될 때의 결과를 나타내는 그래프이며;
- 도 10은 일정한 축 속력의 용접은 전력과 온도 변화를 포함한다는 것을 나타내는 그래프이고;
- 도 11은 온도 반응의 그래프이며;
- 도 12는 저조하게 보고된 토크 해상도의 결과로 미보고된 토크 역학을 나타내는 그래프이고;
- 도 13은 축 속력 제어와 토크(예를 들어 작용력) 제어의 비교에 사용되는 선형의 토크 축 속력 가정 그래프이며;
- 도 14a는 축 속력을 조정하는 전력의 증가 단계를 나타내는 그래프이고;
- 도 14b는 토크를 조정하는 전력의 증가 단계를 나타내는 그래프이며;
- 도 15는 능동적 제어기의 내부루프와 외부루프를 나타내는 블록 도표이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0031] 본 발명의 다양한 원소에 관한 도면에 대한 참조가 수치적 지정으로 주어질 것이며, 본 발명은 본 발명의 분야에 통상의 기술이 있는 자가 본 발명을 제작하고 이용할 수 있도록 논의될 것이다. 다음의 서술은 단지 본 발명에 있는 원리의 예시라는 것으로 이해되어야 하고, 본 발명에 따르는 청구항들을 제한하는 것으로 보아서는 안 된다.
- [0032] 본 명세서에 공개된 바와 같이, 마찰 교반 시스템의 작용력은 유동 피드백에 근거하여 조정된다. 시스템 역학 안에서 시스템의 원리의 유사성에 근거하여 전력(power)은  $P$ , 작용력(effort)은  $e$ , 유동(flow)에 의한 증가는  $f$ 로 정의한다. 이러한 관계는 방정식(2)에 다음과 같이 나타나 있다:
- [0033] 
$$P = e * f \quad \text{방정식(2)}$$
- [0034] 예를 들어, 기계적 회전 영역 안에서의 전력은 각속도(유동)에 의해 증가된 토크(작용력)에 의해 정의된다. 다양한 전력, 작용력 및 유동에 대한 예는 아래의 표 1에 나타나 있다.

표 1

#### 전력 영역

영역	작용력( $e$ )	유동( $f$ )
기계적 (이동)	힘 $F[N]$	속도 $v[m/s]$
기계적 (회전)	토크 $M[Nm]$	각속도 $\omega[rad/s]$
공압	압력 $p[Pa]$	체적 유동 $Q[m^3/s]$
수압	압력 $p[Pa]$	체적 유동 $Q[m^3/s]$
전기력	전압 $u[V]$	전류 $i[A]$
자기력	기자력	유동율

- [0036] 축 구동기의 출력 작용력(output effort)을 조정하는 한 방법은 입력 유동 또는 축 구동기의 작용력을 조정하는 것을 포함한다. 만일 축 구동기가 변압기이면, 출력 작용력은 입력 작용력을 조정함으로써 효율적으로 조정될 수 있다. 만일 축 구동기가 자이레이터(gyrator)라면, 출력된 작용력은 입력 유동을 조정함으로써 효율적으로 조정될 수 있다. 예를 들어, 전기 전동기 구동기는 자이레이터이다. 입력 유동(예를 들어 전류)은 출력 작용력(토크)을 조정하는데 이용될 수 있다.
- [0037] 이러한 세부적 설명은 전기 축 전동기의 제어를 설명하는 특정한 예를 공개한다. 전기 전동기는 자기장 영역을 통한 전기적 영역으로부터 회전하는 기계적 영역으로의 변환을 수행한다. 특히, 전기 전동기를 위한 출력된 토

크는 입력 전류를 조정하는 것에 의하여 제어된다. 작용력을 한 영역에서 다른 영역으로 흐르도록 또는 반대 방향으로 흐르게 하도록 변형시키는 장치는 자이레이터로 알려져 있다. 축 에너지를 제공하는 다수의 장치는 자이레이터이다. 비록 전기 축 전동기가 대표적 실시예라 할지라도, 본 발명은 그러한 실시예에 제한되지 않는다. 예를 들어, 마찰 교반 시스템의 전력은 어떠한 형태의 유동(테이블 1에 제시된 유동 포함)이라도 모니터링하고 어떠한 형태의 작용력(테이블 1에 제시된 작용력 포함)이라도 조정함으로써 제어될 수 있었다.

[0038] 본 명세서에 사용된 바와 같이, 마찰 교반대의 "온도"는 어떠한 직접적 측정 또는 추정된 측정을 일컬으며, 어떠한 유용한 측정 방법 또는 근사 용접(예를 들어 마찰 교반대) 온도를 포함할 수 있다. 예를 들어 마찰 교반대 온도는 측정된 도구의 온도 또는 뒷받침판의 온도에 의해 근사될 수 있다. 초음파 기술과 같은 마찰 교반 작업대의 내부 온도를 측정하기 위한 방법 또한 사용될 수 있다.

[0039] 능동적 제어기(610)에 의해서 작용력의 조정을 거쳐 전력의 제어를 설명하는 시스템 도표는 도 6a와 도 6b에 나타나 있으며,  $P_{cmd}$ 는 지시된 전력,  $f_{rep}$ 는 보고된 유동,  $f_{real}$ 은 실제 유동 및  $e_{cmd}$ 는 지시된 작용력이다. 측정된 값 또는 측정된 값일 수 있는 보고된 유동을 참조하는 것은 중요하다. 도 6b가 추정된 값으로서의 보고된 유동을 나타내는 반면에 도 6a는 측정된 값으로서의 보고된 유동을 나타낸다. 본 발명의 분야에 통상의 기술이 있는 자라면 보고된 유동을 제공하는데 있어서 다양한 종류의 방법이 있을 것이며, 도 6a와 도 6b는 단지 참고만을 위한 예라는 것을 인식할 것이다.

[0040] 본 발명은 마찰 교반 작업의 향상된 제어 시스템이다. 연구는 마찰 교반대에 제공된 전력은 도구 온도를 지시하고 있다는 것을 나타낸다. 축과 관련된 관성으로 인해, 전력의 제어는 앞으로 설명할 내용과 같이 축 속력(예를 들어 유동)보다는 토크(예를 들어 작용력)를 지시함으로써 가장 잘 달성될 수 있다.

[0041] 본 명세서에 공개된 능동적 제어 시스템은 마찰 교반 용접(FSW)을 위한 이중 루프(dual loop) 제어 시스템을 위해 처음으로 개발되었다. 내부루프는 일정한 전력을 유지하며 외부루프는 일정한 온도를 유지하기 위해 전력을 조정한다. 비록 본 명세서에 설명된 본 발명의 많은 작업이 용접 작업의 제어를 위한 이중루프 제어 시스템에 관해 언급한다 하더라도, 본 발명은 이중루프 제어 시스템에 제한되지도 않으며 용접 작업에도 제한되지 않는다.

[0042] 도 7은 본 발명의 이해와 관련있는 마찰 교반 용접 시스템의 하드웨어 원소(700)를 나타내기 위해 제공되었다. 이러한 원소들은 마찰 교반 용접기(도면에는 나타나지 않다)의 일부인 축 전동기(710)를 포함한다. 축 전동기(710)는 축(720)에 결합되어 있다. 회전하는 축은 마찰 교반 용접 도구(730)에 결합되어 있으며, 마찰 교반 용접 도구(730)는 낮은 용융 온도를 갖는 원료와 높은 용융온도를 갖는 원료 모두에서 모든 다양한 형태로 마찰 교반 용접을 하는데 사용된다. 마찰 교반 용접 도구에는 다양한 구성이 있으며 본 명세서가 본 발명과 함께 쓰이는 도구의 다양성을 제한하는 것으로 보아서는 안 된다.

[0043] 본 발명은 마찰 교반 용접(FSW) 처리의 제어를 위해 토크(예를 들어 작용력)와 방정식(2)에 사이에 표현된 관계를 이용한다. 첫번째 실시예에서, 축 전동기(710, 예를 들어 구동기)는 가변 주파수 교류(AC) 유도 전동기(induction motor)이다. 비록 유도 전동기가 나타나 있을지라도, 기계적, 공압, 수력, 전력 및 전자기력 구동기를 포함하는 어떠한 적절한 구동 기구라도 사용될 수 있다. 유도 전동기로 토크를 제어할 때, 전동기 인터페이스 제어 소프트웨어는 능동적 제어기(도면에는 나타나 있지 않다)에 의해 지시된 대로 유량 벡터(flux vector) 제어를 이용하여 일정한 토크를 지시하고 유지한다. 목표 토크는 유도 전동기에 대한 전류의 공급을 제어함으로써 축 전동기에서 얻어진다. 이러한 제어 도표는 도 8에 나타나 있다.

[0044] 축 속력(예를 들어 유동) 피드백이 없는 토크(예를 들어 작용력) 제어는 불안정하다는 것에 주의해야 한다. 일정한 토크는 단지 짧은 시간동안만 유지될 수 있다. 토크는 하중이 토크를 지지할 때만 제어될 수 있다. 자연적으로 처리되는 토크보다 높은 토크는 축 속력의 기하급수적 증가를 유발하며 하중의 급격한 감소로 이어진다. 이는 축 속력과 토크가 증가할 때, 전력이 증가하고 원료가 유화되기 때문이다. 반대로, 만일 토크가 자연적으로 처리되는 토크보다 낮을 때, 축 속력은 원료가 냉각되고 경화됨에 따라 기하급수적으로 감소한다. 처리의 변화는, 축이 멈출때까지 급격하게 감속하게 하거나 또는 기계의 안전 제한에 제동이 걸릴 때까지 가속하게 하면서, 평형을 유지하기 위한 지시된 토크가 너무 낮아지거나 너무 높아지게 한다.

[0045] 축 속력(예를 들어 유동)의 변화에 대응하여 토크(예를 들어 작용력)를 조정함으로써 마찰 교반대에 제공된 전력을 제어하는 것은 안정된 처리라는 것이 관정되어 왔다. 토크는 일정한 전력을 유지하기 위해서 감소하는 축 속력에 대응하여 증가한다. 토크는 일정한 전력을 유지하기 위해서 증가하는 축 속력에 대응하여 감소한다.

[0046] 도 9는 토크(예를 들어 작용력)가 일정한 전압을 유지하기 위해 조정된 지점에서의 용접의 결과를 나타낸다. 소



재가 가열됨에 따라, 원료는 유화된다. 토크와 RPM 신호는 서로 경상(mirror images)이다. 원료가 유화함에 따라 축 속력은 증가한다. 토크(예를 들어 작용력)는 일정한 전압을 유지하기 위해 증가하는 축 속력과 함께 감소한다. 도 9는 토크 제어에 의해 달성된 전력 제어는 안정된 처리라는 것을 나타낸다.

[0047] 도 10은 일정한 축 속력의 용접은 전력과 온도의 변화를 포함한다는 것을 나타낸다. 측정된 전력은 용접 전반에 걸쳐서 지속되는 전력 스파이크를 포함한다. 여과된 전력값은 처리의 변화에 대하여 용접 전반에 걸쳐서 다양하다.

[0048] 이전에, 일정한 평균 전력에서 축 속력의 결과를 조정함으로써 달성되는 전력 제어는 도 6c에 나타나 있었다. 그러나, 실제 전력은 용접 전반에 걸친 토크 스파이크를 포함한다. 온도반응은 온도가 열적 평형에 도달하여 일정해질 때까지 도구의 온도가 점차적으로 오른다는 것을 나타낸다.

[0049] 도 9는 일정한 전력을 유지하기 위한 토크(예를 들어 작용력) 제어를 달성한 전력의 제어가 무시 가능한 변화와 함께 일정한 전력을 생산한다는 것을 나타내었다. 온도 반응은 선형이다. 이는 도구는 여전히 가열되고 있고 정상 상태 온도에 도달할 것이라는 것을 가리킨다.

[0050] 본 발명원리에 대한 설명이 수행되었고 결과가 도 11에 나타나 있다. 전력을 일정하게 유지하기 위한 토크를 조정하는 전력 제어 용접은 2.238kW에서 406.4mm에 대해 실행되었고 다음으로 AA7075 안에서 2.536kW에서 609.6mm(24인치)에 대해 실행되었다. 온도 반응은 도 11에 나타나 있다. 전력에서의 변화가 지시되기 전에, 온도는 일정하다. 전력에서의 변화가 지시된 후에, 새로운 정상 상태 온도에 도달할 때까지 온도는 대수적으로 증가한다. 이러한 결과는 전력에서의 변화는 온도의 변화를 이끈다는 것을 나타낸다.

[0051] 종래의 기술에서 축 속력이 제어전력으로 조정되어 있을 때에, 지시된 축 속력은 축 제어기에 의해 보고되는 토크에 의해 결정된다. 토크가 제어축 속력으로 조정되어 있을 때, 제어토크로 전송된 지시는 축 제어기로 보내진다. 보고된 토크와 지시된 토크 사이의 해상도 차이는 전력 제어 루프의 설계에 영향을 미친다.

[0052] 이러한 실시예에 사용된 토크 측정은 축 전동기 제어기에 의해 보고된다. 그러나, 보고된 토크는 토크역학을 포착하지 못한다. 도 12는 정현파(sinusoidal)의 토크 지시에 대응하여 제어기와 마찰 교환 용접기(FSW machine)에서의 로드셀(load cell)을 사용하여 계산된 토크에 의해 보고된 토크를 나타낸다. 정현파는 보고된 토크의 제한된 해상도로 인해 구형파(square wave)로 보고된다.

[0053] 정현파는 로드셀에 의해 측정된 힘으로부터 계산된 토크 안에서 발견될 수 있다. 로드셀을 이용하여 계산된 토크는 혼선으로 인하여 신호의 질이 좋지 않다. 온도와 전력을 제어 동안의 토크 변화는 소규모의 축 토크이기 때문에, 온도와 전력을 제어하는 동안의 토크 변화는 지시된 토크와 같은 것으로 가정된다.

[0054] 본 발명을 발전시키는 데 있어서, 조정축의 속력과 일정한 전력을 유지하기 위한 토크의 조정을 비교하기 위한 역학 분석이 행해졌다. 도 7로 돌아가면,  $M(mtr)$ 은 전동기의 토크,  $M(spn)$ 은 축 토크,  $D(mtr)$ 은 전동기 도르래의 직경,  $D(spn)$ 은 축 도르래의 직경,  $M(b)$  베어링으로 인하여 손실되는 토크,  $\omega(spn)$ 은 축의 회전 속도, 그리고  $J$ 는 축과 관련된 관성의 질량 모멘트(mass moment)이다. 기어비  $R$ 은 다음과 같이 주어진다:

[0055] 
$$R = D(spn)/D(mtr) \quad \text{방정식(3)}$$

[0056] 그리고 2.5의 값을 가진다.

[0057] 토크와 축 속력의 사이의 관계는 도 7을 이용함으로써 파생되며 다음과 같이 주어진다:

[0058] 
$$RM(mtr) = M(spn) + M(b) + J \omega(spn) \quad \text{방정식(4)}$$

[0059] 효율적인 전동기 토크,  $M(mtr\_eff)$ 는 다음과 같이 주어진다:

[0060] 
$$M(mtr\_eff), = RM(mtr) \quad \text{방정식(5)}$$

[0061] 실험 데이터의 보고된 토크는  $M(mtr\_eff)$ 이다. 방정식(4)를 방정식(5)에 대입하면 다음의 공식이 도출된다:

[0062] 
$$M(mtr\_eff) = M(spn) + M(b) + J \omega(spn) \quad \text{방정식(6)}$$

[0063] 축 속력의 제어와 토크 제어를 비교할 목적으로,  $\omega(spn)$ 와  $M(spn)$ 은 도 13에 나타난 바와 같이 선형적 관계가 있는 것으로 가정되며 다음과 같이 주어진다:

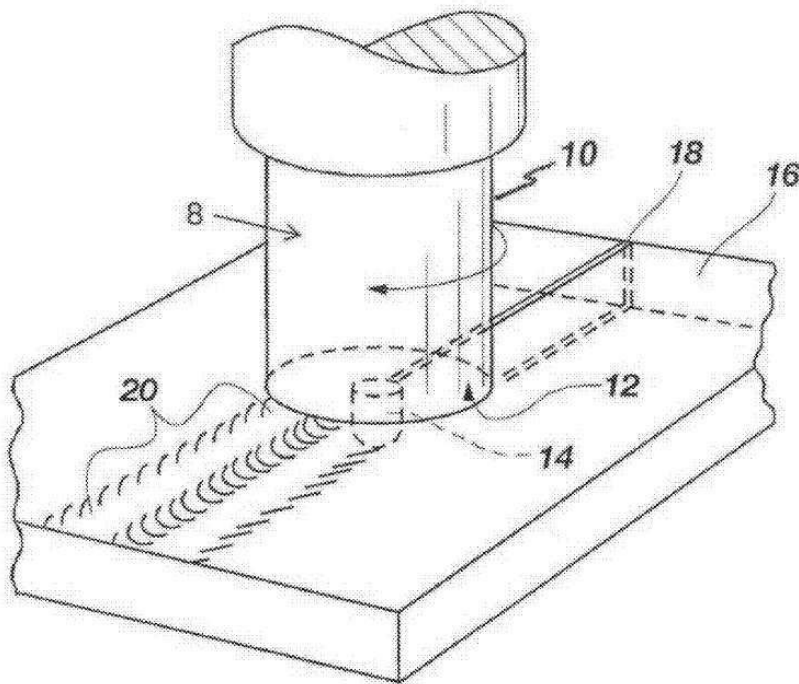
[0064] 
$$\omega(spn) = M(spn)/B \quad \text{방정식(7)}$$

[0065]  $J$ ,  $M(b)$ 와  $B$ 는 일정한 것으로 가정된다.

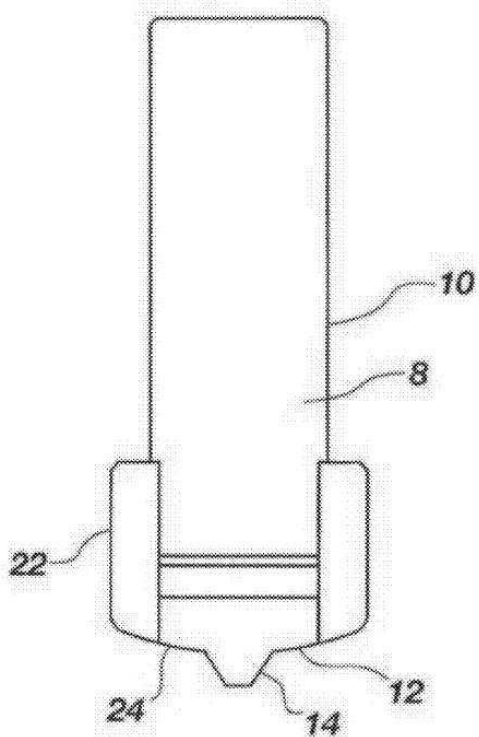
- [0066] 축 전동기의 최대 토크가 한정되어 있기 때문에, 지시축 속력의 변화는, 도 14a에 나타난 바와 같이, 순간적으로 축을 목표 회전 속도로의 가속시키는 것을 시도하며 큰 토크 스파이크를 초래한다.
- [0067] 효율적인 전동기 토크에서 단계 변화에 대한 축 속력은 기하급수적이라는 것이 밝혀졌다. 그러나, 토크 안에서 변화에 대한 축 속력은 어떠한 불연속도 포함하지 않는다.
- [0068] 축 속력에서의 단계적 변화를 위한 실험적 결과와 토크(예를 들어 작용력)는 토크(예를 들어 작용력)는 축 속력과 파생적인 관계를 가지고, 축 속력은 토크(예를 들어 작용력)와 필수적인 관계를 가진다는 것을 입증한다. 도 14a는 RPM의 단계적 변화에 대한 효율적인 전동기 토크를 나타낸다. 순간적으로 목표하는 축 속력의 변화가 형성되면, 전동기는 순간적으로 목표로하는 축의 속력을 달성하기 위한 축의 가속을 시도한다. 이는 전동기 토크의 큰 스파이크를 초래한다.
- [0069] 도 14b는 토크(예를 들어 작용력)를 조정함으로써 전력 제어를 획득할 수 있는 곳에서 전력의 단계적 증가에 대한 축 속력을 나타낸다. 전력의 변화가 지시되었을 때, 목표 전력값을 얻기 위해 토크는 순간적으로 약간 증가한다. 증가한 전력으로 인해, 축 속력(예를 들어 유동)은 증가하게 하고 전동기 토크 또는 작용력은 감소하게 하면서 원료가 유화되기 시작한다. 토크에 대한 축 속력은 어떠한 불연속점도 포함하지 않는다.
- [0070] 도 14a와 14b에 나타난 실험적 데이터는 더 낮은 토크에 대응하는 더 높은 축 속력을 가리키고 더 높은 토크에 대응하는 더 낮은 축 속력을 가리킨다. 이러한 결과는 도 13에 나타난 경사는 음성적이어야 한다는 것을 제안한다.
- [0071] 제시된 제어 방법은  $M(mtr\_eff)$ 는 대략적으로  $M(spn)$ 과 같다는 것을 가정한다. 토크(예를 들어 작용력)는 축 속력(예를 들어 유동)과 파생적 관계를 가진다. RPM의 변화가 지시되었을 때, 축 전동기는 전동기 토크에 스파이크를 유발하면서 축을 새로운 RPM으로 순간적으로 가속시키는 것을 시도한다. 근처의 순간적인 축 전동기의 가속은 전동기 토크와 축 토크 사이의 큰 차이를 유발하였을 것이다. RPM의 변화가 지시되었을 때 전동기 토크는 대략적으로 축 토크와 같지 않다.
- [0072] 실험적 데이터는 토크가 전력을 일정하게 유지하도록 조정되었을 때의 전동기 토크와 축 토크 사이의 차이점은, 축 속력이 전력을 일정하게 유지하기 위해 사용되었을 때의 전동기 토크와 축 토크 사이의 차이점보다 훨씬 더 작다는 것을 나타낸다.
- [0073] 도 14a에 나타난 바와 같이 전력에서 단계 변화가 지시될 때, 축 스파이크가 일어날 동안의 토크오류는 203.0Nm(149.7ft-lb)이며, 토크오류는 높은 전력 수준에서 406%에 대응하며, 낮은 전력 수준에서 565%에 대응한다. 대조적으로, 도 14b에 나타난 바와 같이, 토크를 조정함으로써 전력을 제어하는 것에 대해서는, 전력의 변화 후에 축의 가속과 관련된 오류는 가속이 최상인 부분에서 7.4Nm(5.46ft-lb)이며 전력에서 10%의 오류에 대응한다.
- [0074] 전력을 일정하게 유지시키기 위해 축 속력을 조정하는 것은 보고된 토크가 질이 좋지 않은 제어 신호이기 때문에 바람직하지 않다. 토크 스파이크는 전동기와 축 토크 사이의 차이를 유발하는데, 이 차이는 400%와 같거나 400%보다 훨씬 크다. 보고된 토크 신호는 오류를 더하면서 낮은 해상도를 가지고 있다.
- [0075] 전력을 제어하기 위한 토크 사용의 주요 이점은 RPM의 순간적인 변화를 시도함으로써 인해 초래되는 인공적인 토크 스파이크의 사용을 하지 않는다는 것이다. 전력을 제어하기 위해 토크 제어를 사용하는 것은 낮은 불확실성과 함께 매끄러운 전력 신호를 유발한다. 전동기 토크와 실제 축 토크 사이의 차이는 축의 가속에 비례한다. 토크가 제어되고, 전력과 축 속력이 제어되는 방식으로 변하기 때문에 낮은 불확실성이 존재한다.
- [0076] 내부 제어 루프에 대해 강조했으므로, 이제 외부 제어 루프에 주목한다. 도 15는 본 발명의 첫번째 실시예의 내부루프와 외부루프 모두를 나타내는 블록 도표이다. 비례 적분 미분(Proportional-integral-derivative, PID) 제어기는 펌프 피드백 제어기의 가장 일반적으로 사용되는 형태이다. 외부 루프는 지시된 온도를 유지하기 위한 전력을 조정하기 위해 PID 제어를 이용한다. 외부루프에서 PID 제어의 실행은 도 15에 나타나 있다.  $P(init)$ 는 일정한 전력값이다. PID 제어기는  $P(init)$  용어에 더해지는 전력의 변화를 제공한다.  $P(init)$  용어는 제어기가 일정한 축 속력(예를 들어 유동)을 지시하는 때(37)로부터 온도 제어로 전환되는 순간에서의 축 전력이다. 일단 온도 제어가 개입되면  $P(init)$ 는 온도 제어가 해제될 때 까지 일정하다.
- [0077] 전술한 방식은 단지 본 발명 원리의 적용에 대해 도시적이라는 것을 이해해야 한다. 다수의 변경과 대안적 방식이 본 발명의 정신(spirit)과 범위를 벗어나지 않으면서 본 발명의 분야에 통상의 기술을 가진 자에 의해 고안될 것이다. 첨부된 청구항들은 그러한 변경과 방식을 포함하기 위한 의도이다.

도면

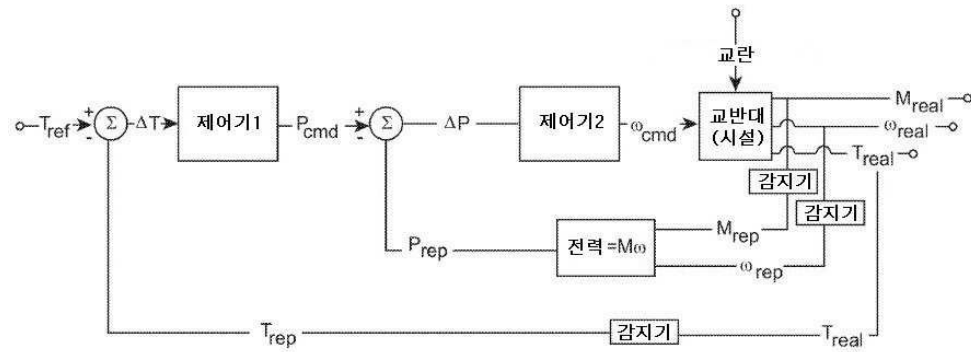
도면1



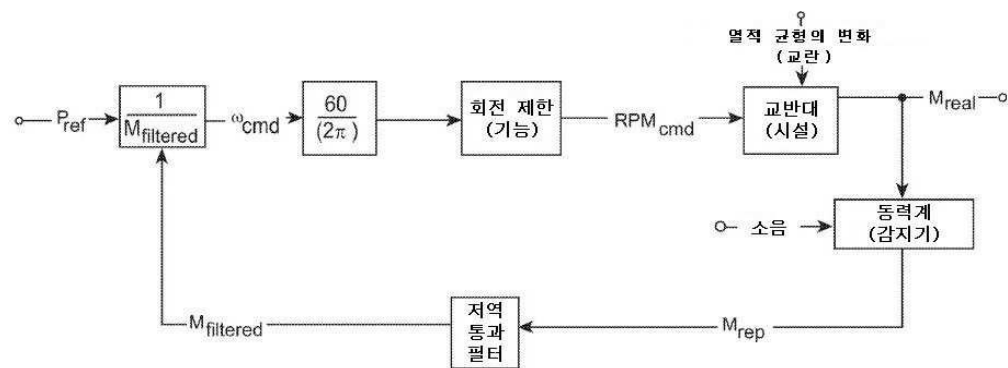
도면2



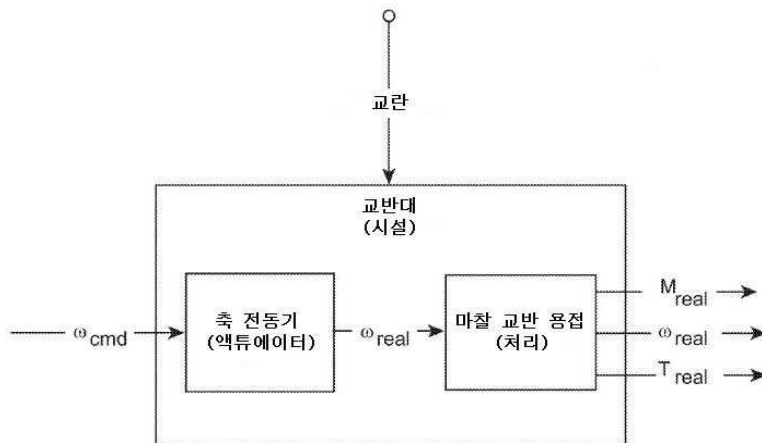
도면3



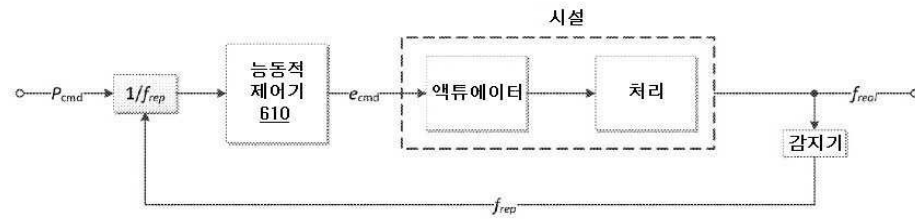
도면4



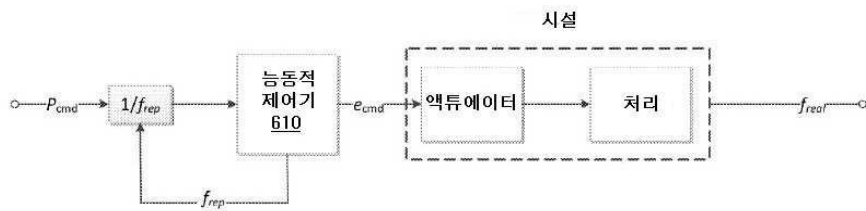
도면5



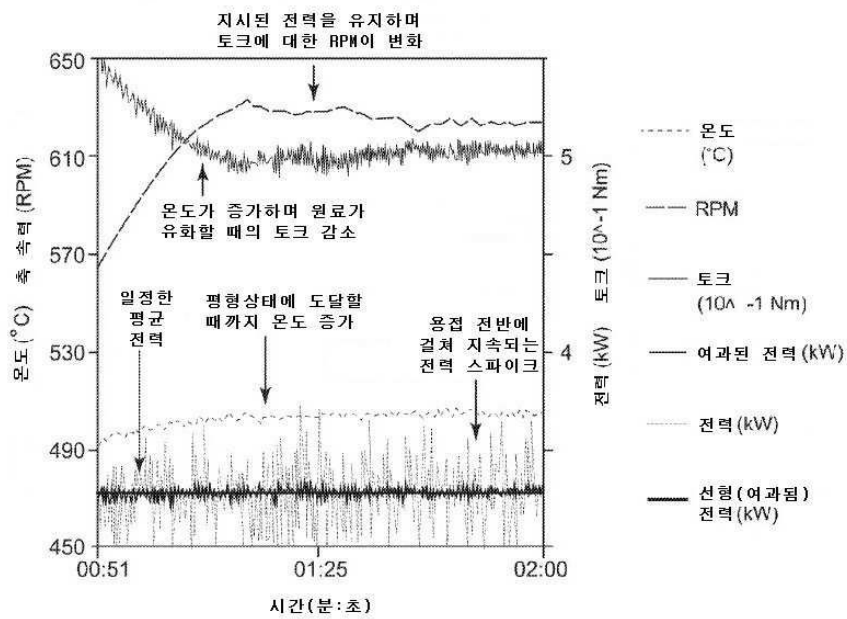
도면6a



도면6b

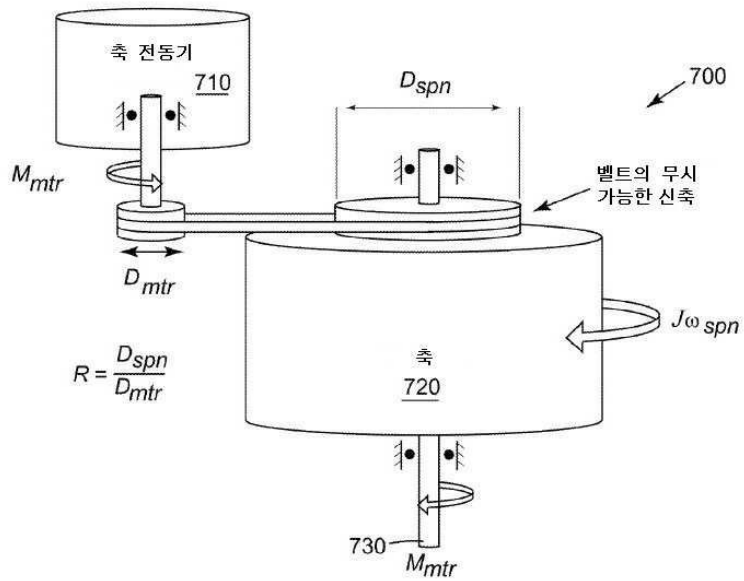


도면6c

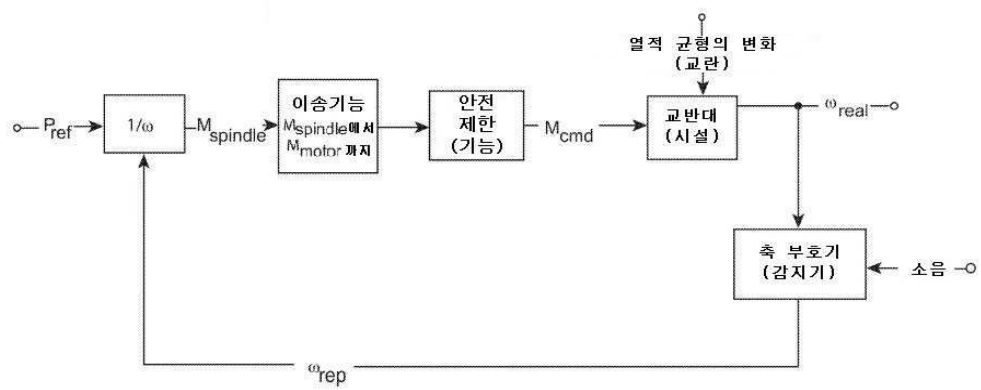




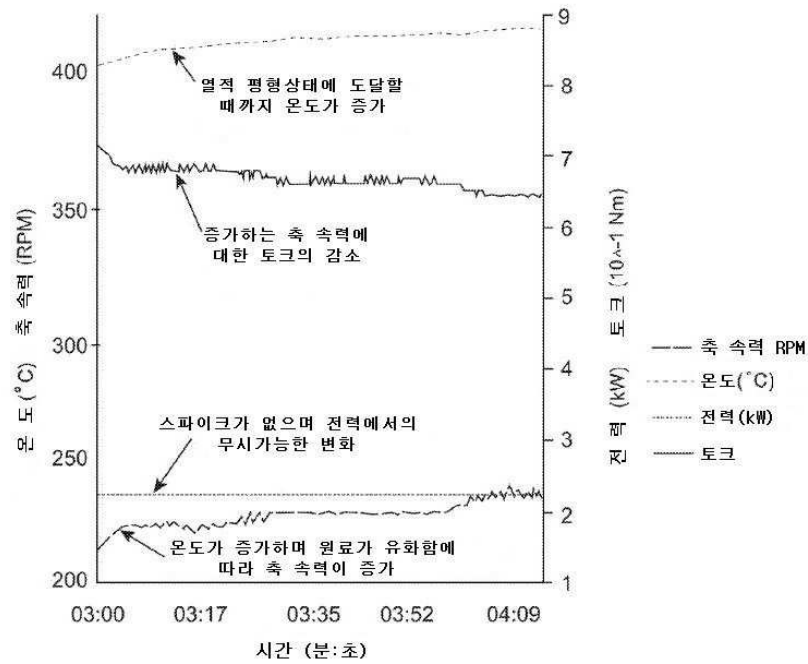
도면7



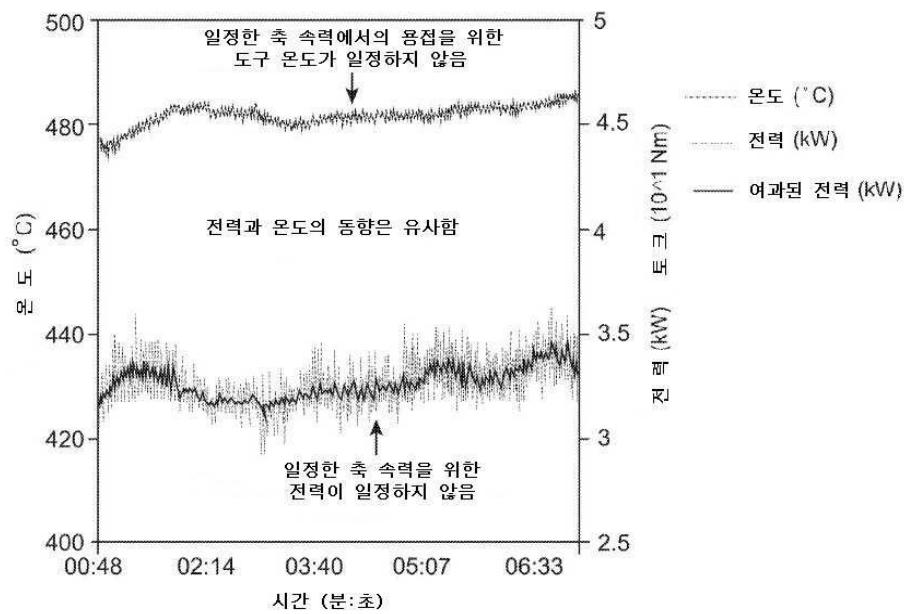
도면8



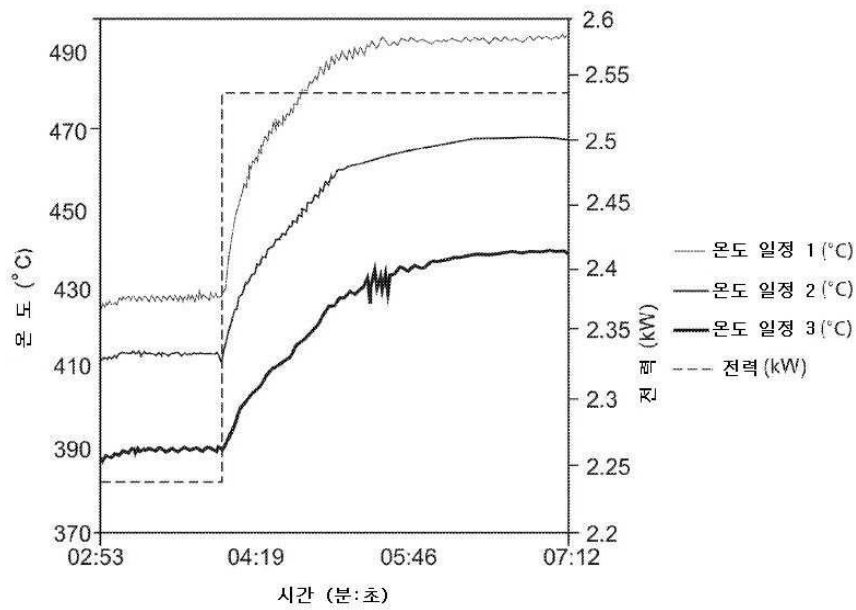
도면9



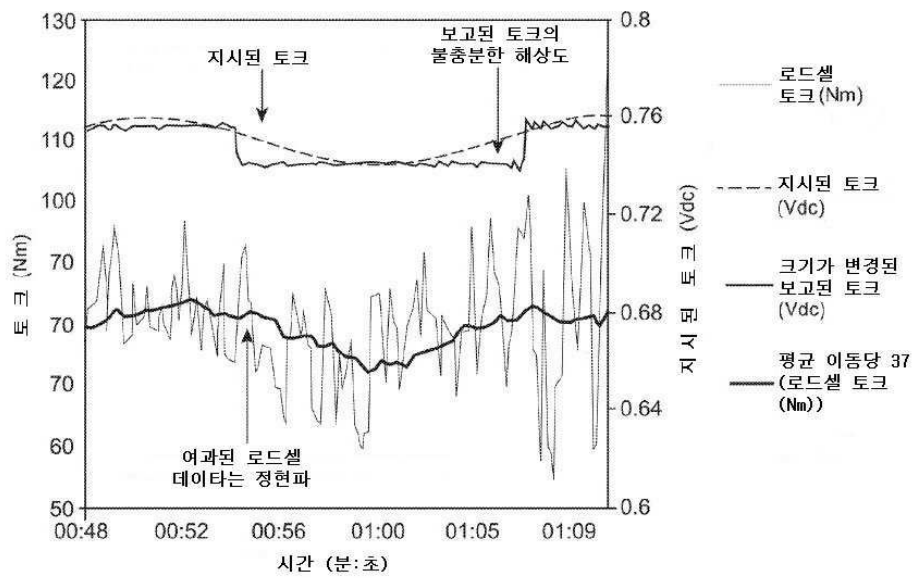
도면10



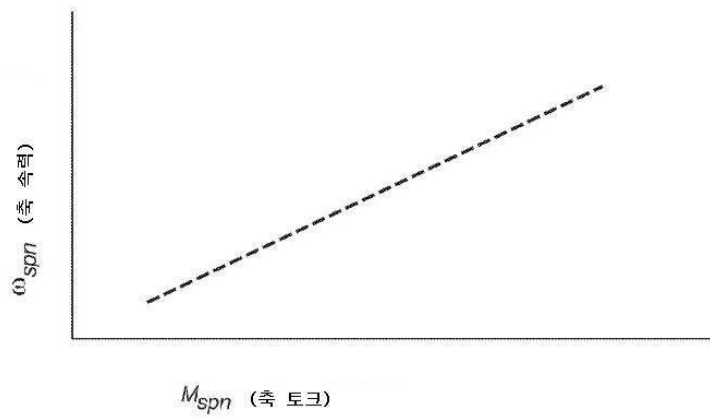
도면11



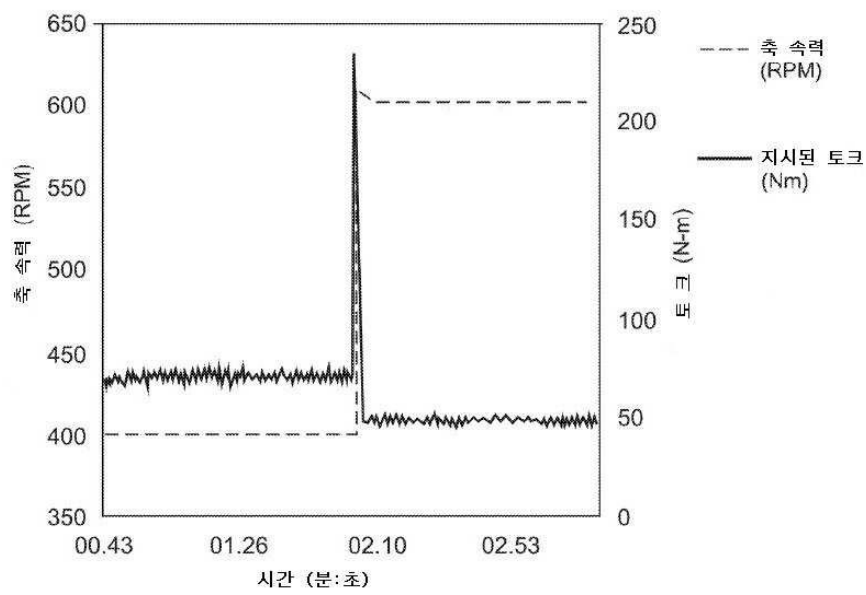
도면12



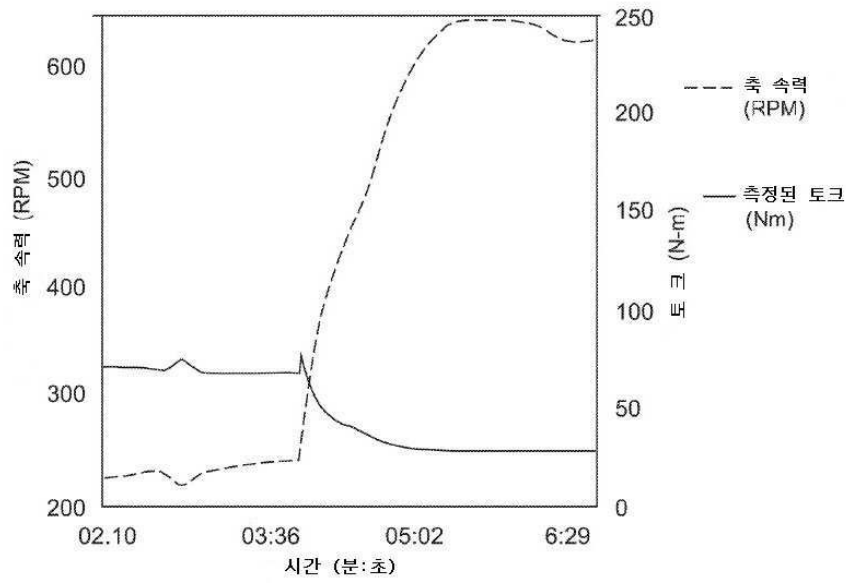
도면13



도면14a



도면14b



도면15

