



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2009년04월17일
(11) 등록번호 10-0893422
(24) 등록일자 2009년04월07일

(51) Int. Cl.

F01D 17/06 (2006.01) F01D 17/00 (2006.01)

F01D 17/24 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2004-0082380

(22) 출원일자 2004년10월14일

심사청구일자 2007년10월15일

(65) 공개번호 10-2005-0036800

(43) 공개일자 2005년04월20일

(30) 우선권주장

10/685,530 2003년10월16일 미국(US)

(56) 선행기술조사문현

JP 57-310 A

(뒷면에 계속)

전체 청구항 수 : 총 10 항

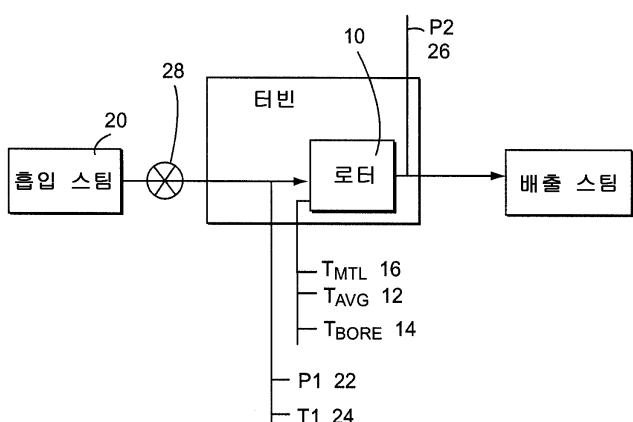
심사관 : 차영란

(54) 증기 터빈의 증기 유동 제어 방법, 증기 터빈 작동 방법 및 증기 터빈의 증기 유동 제어 시스템

(57) 요약

터빈 로터를 갖는 증기 터빈을 통과하는 증기 유동을 제어하는 방법에 있어서, 터빈 로터에서의 열응력을 계산한 것을 근거로 최대 열전달률(18)이 결정된다. 최대 열전달률을 근거로 최대 증기 유량(20)이 계산될 수 있다. 증기 터빈을 통과하는 실제 증기 유량이 결정되고, 실제 증기 유량과 최대 증기 유량 사이의 차이를 근거로 터빈 흡입 밸브(28)가 제어된다. 이러한 방법에서는, 시동 시간을 최소화하고 가동성을 최대화하면서 열응력을 허용 가능 수준으로 제한하는 방식으로, 증기 터빈으로의 증기 유동이 제어될 수 있다.

대 표 도 - 도2



(56) 선행기술조사문현

JP 62-704 A

JP 14155705 A

US 5498131 A

KR 10-1983-4519 A

특허청구의 범위

청구항 1

터빈 로터를 갖는 증기 터빈을 통과하는 증기 유동을 제어하는 방법에 있어서,

- ① 상기 터빈 로터에서의 열응력 계산을 근거로 최대 열전달률(18)을 결정하는 단계와,
 - ② 상기 최대 열전달률을 근거로 최대 증기 유량(20)을 계산하는 단계와,
 - ③ 상기 증기 터빈을 통과하는 실제 증기 유량을 결정하는 단계와,
 - ④ 상기 실제 증기 유량과 최대 증기 유량 사이의 차이를 근거로 터빈 흡입 밸브(28)를 제어하는 단계를 포함하는
- 증기 터빈의 증기 유동 제어 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 단계 ①은, ⑦ 로터 표면 온도(16)와 로터 보어 온도(14) 사이의 차이와, ⑮ 평균 로터 온도(12)를 근거로 로터 표면 응력과 로터 보어 응력을 결정함으로써 실시되는

증기 터빈의 증기 유동 제어 방법.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 단계 ②는, 최대 열전달률(Q_{\max}), 증기 온도(T_{stm}) 및 터빈 금속 온도(T_{MTL})를 근거로 최대 증기 유량(W_{\max})을 계산함으로써 실시되는

증기 터빈의 증기 유동 제어 방법.

청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 단계 ②는, 다음의 관계식

$$W_{\max} = W_{1r} \times \left(\frac{Q_{\max}}{abs(T_{stm} - T_{mtl}) \times k1} \right)^{k2}$$

[W_{1r} 은 정격 흡입 유량(kg/s)이고, $k1$ 과 $k2$ 는 조정 상수임]

에 따라 상기 최대 증기 유량(W_{\max})을 계산함으로써 실시되는

증기 터빈의 증기 유동 제어 방법.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 단계 ②는, 최대 열전달률(Q_{\max}), 증기 온도(T_{stm}) 및 터빈 금속 온도(T_{MTL})를 근거로 최대 증기 유량(W_{\max})을 계산함으로써 실시되는

증기 터빈의 증기 유동 제어 방법.

청구항 6

터빈 로터를 갖는 증기 터빈을 작동시키는 방법에 있어서,

- ① 상기 터빈 로터에서의 열응력과 관련된 변수를 근거로 최대 증기 유량(20)을 계산하는 단계와,
 - ② 상기 증기 터빈을 통과하는 실제 증기 유량을 결정하는 단계와,
 - ③ 상기 실제 증기 유량과 최대 증기 유량 사이의 차이를 근거로 터빈 흡입 밸브(28)를 제어하는 단계를 포함하는
- 증기 터빈 작동 방법.

청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 단계 ①에서의 열응력과 관련된 상기 변수는, ⑦ 로터 표면 온도(16)와 로터 보어 온도(14) 사이의 차이와, ⑨ 평균 로터 온도(12)를 근거로 결정된 로터 보어 응력과 로터 표면 응력을 포함하는 증기 터빈 작동 방법.

청구항 8

제 7 항에 있어서,

상기 단계 ①은, 최대 열전달률(Q_{\max}), 증기 온도(T_{stm}) 및 터빈 금속 온도(T_{MTL})를 근거로 최대 증기 유량(W_{\max})을 계산함으로써 실시되는

증기 터빈 작동 방법.

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 단계 ①은, 다음의 관계식

$$W_{\max} = W_{1r} \times \left(\frac{Q_{\max}}{abs(T_{stm} - T_{mtl}) \times k1} \right)^{k2}$$

[W_{1r} 은 정격 흡입 유량(kg/s)이고, $k1$ 과 $k2$ 는 조정 상수임]

에 따라 상기 최대 증기 유량(W_{\max})을 계산함으로써 실시되는

증기 터빈 작동 방법.

청구항 10

터빈 로터를 갖는 증기 터빈을 통과하는 증기 유동을 제어하기 위한 제어 시스템에 있어서,

흡입 증기 온도(24)를 측정하는 제 1 온도 측정 장치와,

웰 내면 온도(16)에 의해 근사되는 로터 표면 온도를 측정하는 제 2 온도 측정 장치와,

흡입 증기 압력(22)을 측정하는 제 1 압력 측정 장치와,

배출 증기 압력(26)을 측정하는 제 2 압력 측정 장치와,

상기 제 1 및 제 2 온도 측정 장치, 및 상기 제 1 및 제 2 압력 측정 장치와 연통하며, ⑦ 로터 표면 온도와, 근사한 로터 보어 온도 사이의 차이와, ⑨ 상기 터빈 로터에서의 평균 로터 온도 열응력 계산을 근거로 결정된 로터 보어 응력과 로터 표면 응력에 따라 최대 열전달률(18)을 결정하는 제어기(30)를 포함하며,

상기 제어기는, 상기 최대 열전달률을 근거로 최대 증기 유량을 계산하고, 흡입 증기 압력, 흡입 증기 온도 및 배출 증기 압력을 근거로 상기 증기 터빈을 통과하는 실제 증기 유량을 결정하며, 상기 실제 증기 유량과 상기 최대 증기 유량 사이의 차이를 근거로 터빈 흡입 밸브를 제어하는

증기 터빈의 증기 유동 제어 시스템.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

<11> 본 발명은 증기 터빈 제어 및 성능에 관한 것으로, 특히 터빈 헬과 로터의 제어된 가열을 이용하여 수명 주기 응력(life cycle stress)을 한계 내로 유지시키면서, 증기 터빈의 로딩 및 언로딩을 실시하는 제어 알고리즘 및 시스템에 관한 것이다.

<12> 발전용 증기 터빈은 대직경 로터와 두꺼운 헬을 갖는다. 로터에는, 로딩 및 언로딩 주기 중에 원심적 로딩 및 열적 팽창에 따라 응력이 가해진다. 각각의 시동/정지 주기 중에는, 로터와 헬에 저주기 피로(low cycle fatigue)가 축적된다. 축적된 저주기 피로가 재료 한계를 넘어설 때는, 균열 형성의 가능성이 존재하게 되므로, 장비를 교체하여야 한다. 각각의 시동 주기 중에 축적된 저주기 피로 손상 수준은 그 시동 주기에 대한 최고점 응력(peak stress)의 함수이다. 터빈 흡입 증기 온도와 유량에 의해 금속 온도 변화율이 결정되며, 그에 따라 헬과 로터에서의 열응력이 결정된다.

<13> 현재, 증기 터빈에서의 열응력을 조절하기 위한 방법에서는, 로터 응력을 온도 측정치의 함수, 전형적으로는 터빈 흡입구 근방의 헬 금속에 대한 온도 측정치의 함수로서 추정하고 있다. 응력 추정치가 저주기 피로 한계에 가까워짐에 따라, 증기 터빈 흡입 밸브의 개방률이 감소된다. 이러한 방법의 단점은, 열적 전이로부터 10분 내지 15분 후에 최고점 응력이 발생한다는 것이다. 시간 지연이 지나치게 길기 때문에, 고응력 주기를 방지하기 위해서는, 증기 유량이 매우 느려져야 한다. 이로 인해 터빈의 가동성이 제한되어 시동 시간이 연장된다.

<14> 따라서, 시동 시간을 최소화하고 가동성을 최대화하면서 열응력을 허용 가능 수준으로 제한하는 방식으로, 증기 터빈으로의 증기 유동의 제어를 실시하는 것이 바람직할 것이다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

<15> 본 발명의 일 예시적 실시예에서, 터빈 로터를 갖는 증기 터빈을 통과하는 증기 유동을 제어하는 방법은, ① 터빈 로터에서의 열응력 계산을 근거로 최대 열전달률을 결정하는 단계와, ② 상기 최대 열전달률을 근거로 최대 증기 유량을 계산하는 단계와, ③ 상기 증기 터빈을 통과하는 실제 증기 유량을 결정하는 단계와, ④ 상기 실제 증기 유량과 최대 증기 유량 사이의 차이를 근거로 터빈 흡입 밸브를 제어하는 단계를 포함한다.

<16> 본 발명의 다른 예시적 실시예에서, 터빈 로터를 갖는 증기 터빈을 작동시키는 방법은, ① 상기 터빈 로터에서의 열응력과 관련된 변수를 근거로 최대 증기 유량을 계산하는 단계와, ② 상기 증기 터빈을 통과하는 실제 증기 유량을 결정하는 단계와, ③ 상기 실제 증기 유량과 최대 증기 유량 사이의 차이를 근거로 터빈 흡입 밸브를 제어하는 단계를 포함한다.

<17> 본 발명의 또 다른 예시적 실시예에서, 터빈 로터를 갖는 증기 터빈을 통과하는 증기 유동을 제어하기 위한 제어 시스템은, 흡입 증기 온도와, 헬 내면 온도에 의해 근사되는 로터 표면 온도를 측정하는 제 1 및 제 2 온도 측정 장치를 포함한다. 제 1 및 제 2 압력 측정 장치가 흡입 증기 압력과 배출 증기 압력을 측정한다. 제어기가 제 1 및 제 2 온도 측정 장치, 그리고 제 1 및 제 2 압력 측정 장치와 소통하여, ① 로터 표면 온도와 로터 보어(bore) 온도 사이의 차이와, ② 터빈 로터에서의 평균 로터 온도 열응력 계산을 근거로 결정된 로터 표면 응력 및 로터 보어 응력에 따라 최대 열전달률을 결정한다. 제어기는, ⑦ 최대 열전달률을 근거로 최대 증기 유량을 계산하고, ⑧ 흡입 증기 압력, 흡입 증기 온도 및 배출 증기 압력을 근거로 증기 터빈을 통과하는 실제 증기 유량을 결정하며, ⑨ 실제 증기 유량과 최대 증기 유량 사이의 차이를 근거로 터빈 흡입 밸브를 제어한다.

발명의 구성 및 작용

<18> 증기 터빈과 같은 화력 발전소는 연료를 태워 열을 생성하는 보일러를 갖고 있다. 발전소에서는, 열 에너지가 금속 파이프로 전도되어 파이프 내의 물을 끓여 증기화시킨다. 이 증기는 고압에서 터빈에 공급된다. 터빈은 소정 각도로 틀어진 다수의 블레이드 또는 베켓을 갖고 있다. 증기가 베켓을 때리면, 베켓은 터빈 샤프트를 회전시키는데, 이 터빈 샤프트는 베켓의 저부에 부착되어 있다. 터빈 샤프트가 회전함에 따라, 발전기가 기계적 회전 에너지를 전기로 변환시킨다.

- <19> 발전기는 와이어 또는 코일로 감긴 고정 링 내측에 자석을 갖고 있다. 발전기 내부의 자석이 회전함에 따라 와이어에 전류가 생성되는데, 즉 기계적 에너지가 전기 에너지로 변환되는 것이다.
- <20> 증기 터빈 내의 열전달은 증기 터빈 흡입 제어 밸브의 조정에 의해 터빈으로의 증기 유동을 조정함으로써 제어 된다. 아래에서 보다 상세히 설명하겠지만, 증기 터빈 웰 및 로터에서의 열응력을 제한하는 적절한 열전달률을 초래하는 증기 유량은 흡입 증기 온도와 웰 금속 온도를 근거로 결정될 수 있다. 터빈 흡입 증기 압력, 흡입 증기 온도 및 터빈 배출 압력은 증기 터빈 유량을 계산하는 데 사용되며, 이렇게 계산된 증기 터빈 유량은 제어 루프의 측정된 피드백으로서 사용될 수 있다.
- <21> 증기 터빈의 로딩 속도/loading rate)는, 로터 내의 온도 구배에 기인한 최대 허용 가능 응력에 의해 제한된다. 도 1은 로터 단면(10)의 예시적 개략도이다. 열적 보어 응력(thermal bore stress)은 다음의 수식에 의해 주어 진다.
- <22> [수학식 1]
- $$\sigma_B = \frac{Ea}{1-v} (T_{avg} - T_{bore})$$
- <23>
- <24> 여기서, E 는 탄성률(modulus of elasticity)이고, a 는 열팽창 계수, v 는 프아송 비(Poisson's ratio)이다. T_{AVG} (12)는 로터 평균 금속 온도이고, T_{BORE} (14)는 로터 보어 금속 온도이다. 열팽창 계수는 재료에 따라 달라지며, 로터 평균 온도(12)의 함수이다. 탄성률은 재료에 따라 달라지며, 보어 온도(14)의 함수이다.
- <25> [수학식 2]
- <26> $E = EMODO - T_{BORE} \cdot EMOD1$
- <27> [수학식 3]
- <28> $a = a_0 + T_{AVG} \cdot a_1$
- <29> 여기서, 상기 수식의 EMODO, EMOD1, a_0 및 a_1 은 상수이다. 계산된 보어 열응력을 허용 가능한 보어 응력으로 나누면, 정규화(normalized) 보어 응력이 백분율로 산출된다.
- <30> 표면 변형률(surface strain)은 다음의 수식에 의해 주어진다.
- <31> [수학식 4]
- <32> $\epsilon = a (T_{MTL} - T_{AVG})$
- <33> 여기서, a 는 열팽창 계수이고, T_{MTL} 은 로터 웰 온도(16)이다. T_{MTL} 은 증기 터빈 웰의 내면에 설치된 열전쌍에 의해 측정된다. 로터 표면 또는 보어의 온도를 직접 측정하는 것은 실제적이지 않다. T_{BORE} 와 T_{AVG} 는 로터의 열적 모델을 이용하여 계산/근사되는데, 여기서 T_{MTL} 은 경계 조건이다.
- <34> 후크의 법칙을 이용하면, 다음 수식으로부터 표면 응력을 얻을 수 있다.
- <35> [수학식 5]
- <36> $\sigma_s = E \epsilon$
- <37> 표면 응력은 허용 가능 표면 응력에 대해 정규화된다. 허용 가능 표면 응력은 열응력 집중 요인에 따라 결정되며, 로딩과 언로딩에 대해 상이하다.
- <38> 상기 수식이 나타내는 바와 같이, 표면 응력과 보어 응력 양자는 표면 관련 온도 [T_{MTL} (16) 또는 T_{BORE} (14)]와 평균 로터 온도 [T_{AVG} (12)] 사이의 온도 차이에 비례한다.
- <39> 실린더에 대한 열전달은 다음의 수식과 같다.

<40> [수학식 6]

$$q_r = \frac{2\pi L k (T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

<41>

<42> 열응력이 로터 내의 온도 차이에 비례한다는 것을 알고 있으므로, 온도 차이는 열전달률 q (18)에 비례하고, 열응력은 열전달률(18)을 제어함으로써 제어될 수 있다. 최대 열전달률(Q_{\max})이 계산될 수 있기 때문에, 온도 구배가 허용 가능 표면 및 보어 응력을 초래한다. 열전달률은 온도 차이(temperature differential) $(T_{\text{stm}} - T_{\text{MTL}})$ 와 증기 유량의 함수이다. 따라서, 도 3을 참조하면, 최대 열전달률(Q_{\max}), 증기 온도(T_{stm}) 및 증기 터빈 금속 온도(T_{MTL})를 근거로 최대 증기 유량(W_{\max})이 계산될 수 있다.

<43>

[수학식 7]

$$<44> W_{\max} = W_{1r} \times \left(\frac{Q_{\max}}{\text{abs}(T_{\text{stm}} - T_{\text{MTL}}) \times k1} \right)^{k2}$$

<45>

여기서, W_{1r} = 정격 흡입 유량(kg/s),

<46>

 Q_{\max} = 최대 열전달률,

<47>

 T_{stm} = 흡입 증기 온도(°F),

<48>

 T_{MTL} = 셀 온도(°F),

<49>

 $k1$ = 조정 상수,

<50>

 $k2$ = 조정 상수임.

<51>

금속 온도가 증기 온도에 접근함에 따라, 온도 차이($T_{\text{stm}} - T_{\text{MTL}}$)가 감소하여, 주어진 Q_{\max} 에 대해 보다 높은 증기 유량이 허용된다.

<52>

제어 루프에 대해서는, 도 2와 도 3을 참조하면, 증기 터빈을 통과하는 증기 유량(20)이 계산될 수 있다. 흡입 증기 압력 $P1(22)$, 흡입 증기 온도 $T1(24)$ 및 배출 증기 압력 $P2(26)$ 을 근거로 다음의 수식을 사용하여 증기 유량을 계산한다.

<53>

[수학식 8]

<54>

$$W_1 = k \sqrt{\rho_1 P_1 (1 - X^2)}$$

<55>

[수학식 9]

<56>

$$X = \frac{P_2}{P_1}$$

<57>

[수학식 10]

<58>

$$\rho_1 = f(P_1, T_1)$$

<59>

[수학식 11]

<60>

$$k = \frac{W_{1r}}{\sqrt{\rho_{1r} P_{1r} (1 - X_r^2)}}$$

<61>

[수학식 12]

<62>

$$X_r = \frac{P_{2r}}{P_{1r}}$$

<63> [수학식 13]

$$\rho_{1r} = f(P_{1r}, T_{1r})$$

<65> 여기서 P_{1r} 은 정격 흡입 압력(PSIA), P_{2r} 은 정격 배출 압력(PSIA), T_{1r} 은 정격 흡입 온도($^{\circ}\text{F}$)이고, W_{1r} 은 정격 흡입 유량(kg/s)이다. 정격 증기 조건 P_{1r} , P_{2r} , T_{1r} , W_{1r} 은 본 발명이 적용되는 특정 터빈에 대한 정격 출력에서 발생한다. 전형적으로, 정격 출력은 터빈의 정상 완전 부하 출력이다. 이러한 증기 조건은 증기 터빈 열역학 엔지니어에 의한 증기 터빈 설계 중에 결정된다. 정격 증기 조건은 상수들을 계산하는 데 사용되며, 이렇게 계산된 상수들은 정격 이외의 작동 지점에서의 증기 터빈 유량을 결정하는데 이용될 수 있다.

<66> 증기 유량 W_1 은 비례 적분 제어기(proportional plus integral controller)(30)에 대한 피드백인데, 여기서 셋 포인트는 위에서 구한 최대 증기 유량 W_{\max} 이다. 제어기의 출력은 증기 터빈 흡입 제어 밸브(28)의 위치를 명령 한다.

<67> 증기 터빈 흡입 제어 밸브를 흡입 증기 온도와 셀 금속 온도의 합수로서 제어함으로써, 가열 속도에 의한 열응력의 허용 가능 수준 초과가 발생되지 않으면서 최대량의 증기가 터빈에 유입된다. 또한, 차동 팽창 또는 반경 방향 간극과 같은, 응력 이외의 요인이 증기 터빈의 로딩 속도를 제한할 수도 있다. 이러한 경우, 제어 시스템 및 방법은 터빈 가열 속도를 제어할 수 있고, 따라서 차동 팽창과 반경 방향 간극을 제어할 수 있다.

<68> 가장 실제적이자 바람직하다고 여겨지는 실시예와 관련하여 본 발명이 설명되었으나, 본 발명은 개시된 실시예에 한정되지 않을 뿐만 아니라, 첨부된 청구항의 진의와 범위 내에서 포함되는 다양한 변형 및 동등한 구성을 포괄하도록 의도된다는 점을 이해할 것이다.

발명의 효과

<69> 본 발명은 시동 시간을 최소화하고 가동성을 최대화하면서 열응력을 허용 가능 수준으로 제한할 수 있는 증기 터빈 제어 방법 및 시스템을 제공하는 효과를 갖는다.

도면의 간단한 설명

<1> 도 1은 터빈 로터의 개략 단면도,

<2> 도 2는 다양한 센서를 포함하는 터빈의 개략도,

<3> 도 3은 제어 시스템과 방법을 도시하는 개략적 제어 다이어그램.

<4> <도면의 주요부분에 대한 부호의 설명>

<5> 10 : 로터 단면 12 : T_{AVG}

<6> 14 : T_{BORE} 16 : 로터 셀 온도

<7> 18 : 열전달률 20 : 증기 유동

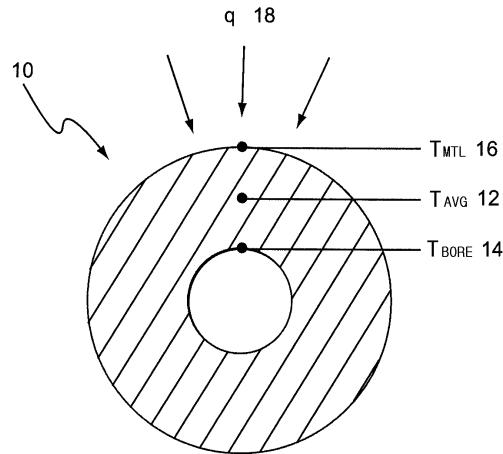
<8> 22 : 흡입 증기 압력 24 : 흡입 증기 온도

<9> 26 : 배출 증기 압력 28 : 흡입 제어 밸브

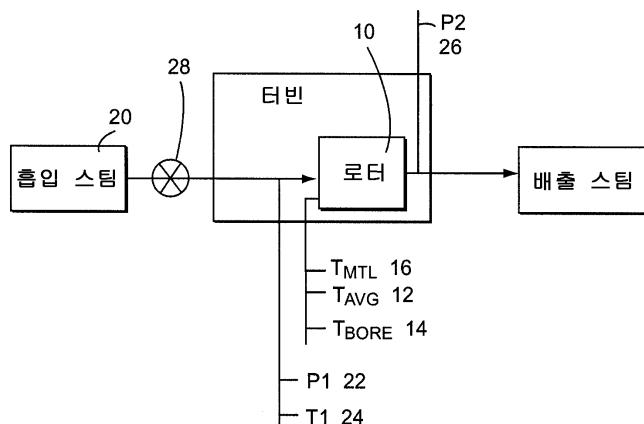
<10> 30 : 일체형 제어기

도면

도면1



도면2



도면3

