



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2014-0073615
(43) 공개일자 2014년06월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B23K 9/095 (2006.01) B23K 9/09 (2006.01)
B23K 31/12 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2012-0135699
(22) 출원일자 2012년11월28일
심사청구일자 2012년11월28일

(71) 출원인
서강대학교산학협력단
서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)
(72) 발명자
김동철
서울 용산구 회나무로32길 45, 302호 (이태원동, SOD빌라)
한규현
서울특별시 종로구 평창동 현대빌라 3-302
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인세림

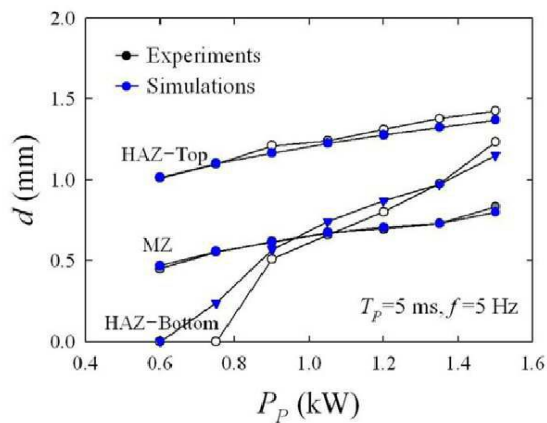
전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 발명의 명칭 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법

(57) 요약

지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법이 개시된다. 본 발명의 실시 예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법은 지르코늄 합금 박판의 레이저 펄스 용접에 사용될 펄스출력, 펄스시간, 펄스주파수 및 펄스에너지를 포함하는 펄스용접변수를 확인하고, 확인된 펄스용접변수를 근거로 하여 용접부의 용융부 크기 및 열영향부 크기를 추정하고, 추정된 열영향부를 근거로 하여 용접부의 z축 방향 변형량을 추정하고, 추정된 용융부 크기, 열영향부 크기 및 z축 방향 변형량을 근거로 하여 지르코늄 합금 박판의 용접 변형을 판단하는 것을 포함한다.

대표도 - 도6



(72) 발명자

이형일

경기도 고양시 일산서구 대화동
대화성저건영1502-304

김낙수

경기 고양시 일산동구 노루목로 79, 406동 1401호
(장항동, 호수마을4단지아파트)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 201133047

부처명 교육과학기술부

연구사업명 핵연료 지지격자 공정해석 및 설계 융합 시스템 개발

연구과제명 핵연료 지지격자 공정해석 및 설계 융합 시스템 개발

기 여 율 1/1

주관기관 (재)한국연구재단

연구기간 2011.05.01 ~ 2012.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

지르코늄 합금 박판의 레이저 펄스 용접에 사용될 펄스출력, 펄스시간, 펄스주파수 및 펄스에너지를 포함하는 펄스용접변수를 확인하고,

상기 확인된 펄스용접변수를 근거로 하여 용접부의 용융부 크기 및 열영향부 크기를 추정하고,

상기 추정된 열영향부를 근거로 하여 상기 용접부의 z축 방향 변형량을 추정하고,

상기 추정된 용융부 크기, 열영향부 크기 및 z축 방향 변형량을 근거로 하여 상기 지르코늄 합금 박판의 용접 변형을 판단하는 것을 포함하는 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 용융부의 크기는 상기 펄스 출력에 비례하는 것으로 추정하는 것을 포함하는 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 열영향부의 크기는 상기 펄스에너지 또는 펄스시간이 증가할수록 증가하는 것으로 추정하는 것을 포함하는 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 용접부의 z축 방향 변형량은 상기 열영향부의 크기가 증가할수록 감소하는 것으로 추정하는 것을 포함하는 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 지르코늄 합금 박판의 용접 변형은 상기 열영향부의 크기가 증가할수록 큰 것으로 판단하는 것을 포함하는 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 지르코늄 합금은 지르칼로이 4(zircaloy-4)인 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법에 관한 것으로서, 지르칼로이-4(Zircaloy-4)에 대한 레이저 용접 변형을 해석할 수 있는 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 일반적으로 레이저 펄스 심용접은 다양한 용접변수를 포함해 특성화해내기 어려우며, 수초의 시간단위 동안 다수의 밀리세컨 단위 펄스가 투입되기 때문에 해석의 효율성도 떨어진다.

[0003] 이러한 어려움들에 때문에 레이저펄스 심용접에 대한 용접부 형상 예측 및 용접변형을 예측하는 일련의 과정을

분석한 연구가 거의 없다. 더군다나 지르코늄 합금의 용접에 관한 수치해석적 연구는 더욱 미흡한 실정이다. 즉, 레이저 펄스 심용접에서의 용접변형 예측에 대한 연구가 미진하며, 지르코늄 합금에 대한 용접해석은 전무하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0004] 본 발명의 일측면은 지르코늄 합금에 특성화된 레이저 용접 변형 예측기술을 개발하여 핵연료봉 지지격자체 등에 사용되는 지르코늄 박판의 성형기술을 향상시킬 수 있는 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법을 제공한다.
- [0005] 과제의 해결 수단
- [0006] 본 발명의 일 측면에 따르면, 지르코늄 합금 박판의 레이저 펄스 용접에 사용될 펄스출력, 펄스시간, 펄스주파수 및 펄스에너지를 포함하는 펄스용접변수를 확인하고, 상기 확인된 펄스용접변수를 근거로 하여 용접부의 용융부 크기 및 열영향부 크기를 추정하고, 상기 추정된 열영향부를 근거로 하여 상기 용접부의 z축 방향 변형량을 추정하고, 상기 추정된 용융부 크기, 열영향부 크기 및 z축 방향 변형량을 근거로 하여 상기 지르코늄 합금 박판의 용접 변형을 판단하는 것을 포함하는 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측방법에 제공될 수 있다.
- [0007] 또한, 상기 용융부의 크기는 상기 펄스 출력에 비례하는 것으로 추정하는 것을 포함할 수 있다.
- [0008] 또한, 상기 열영향부의 크기는 상기 펄스에너지 또는 펄스시간이 증가할수록 증가하는 것으로 추정하는 것을 포함할 수 있다.
- [0009] 또한, 상기 용접부의 z축 방향 변형량은 상기 열영향부의 크기가 증가할수록 감소하는 것으로 추정하는 것을 포함할 수 있다.
- [0010] 또한, 상기 지르코늄 합금 박판의 용접 변형은 상기 열영향부의 크기가 증가할수록 큰 것으로 판단하는 것을 포함할 수 있다.
- [0011] 또한, 상기 지르코늄 합금은 지르칼로이 4(zircaloy-4)인 것을 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0012] 본 발명에 실시예에 따르면, 지르코늄 합금에 특성화된 레이저 용접 변형 예측기술을 개발함으로써 핵연료봉 지지격자의 용접 등에 쓰이는 기존 용접해석기법의 정확성을 강화할 수 있고 향후 개발될 새로운 지지격자체 모델에 최적화된 레이저 용접공정을 설계할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0013] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 수정 가우시안 모델 열원을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 3차원 유한요소모델을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 레이저 점 용접의 구조를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 레이저 펄스 용접의 유한요소모델을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 용접과정 중에 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)가 형성되는 것을 설명하기 위한 도면이다.
- 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스출력에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 변화를 설명하기 위한 그래프이다.
- 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스출력에 따른 용

용부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 z방향 변형량 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스시간에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

도 9는 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스주파수에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 z방향 변형량 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

도 10은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스주파수에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

도 11은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스주파수에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 z방향 변형량 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0014] 이하에서는 본 발명의 실시예들을 첨부 도면을 참조하여 상세히 설명한다. 여기서, 이하에 소개되는 실시 예들은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 예로서 제공되는 것이다. 따라서, 본 발명은 이하 설명되는 실시 예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있으며, 나아가 본 발명을 명확하게 설명하기 위하여 설명과 관계없는 부분은 도면에서 생략하였으며 도면들에 있어서, 구성요소의 폭, 길이, 두께 등은 편의를 위하여 과장되어 표현될 수 있다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.
- [0015] 레이저 용접은 자동차, 로봇, 항공우주, 원자력 등 다양한 산업에서 접합방법으로 널리 쓰인다. 레이저용접은 아크용접과 같은 기존의 용접방식에 비해 작은 열영향부가 생성되기 때문에, 그에 따른 열변형과 잔류응력이 작게 형성된다. 특히 레이저 펄스용접방식(Pulsed laser welding)은 연속용접방식에 비해 더욱 적은 입열량으로 용접하기 때문에, 최소의 열영향부와 열변형을 형성할 수 있다. 이러한 이유로 박판이나 정밀기계 등의 용접에는 레이저 펄스용접이 널리 사용된다.
- [0016] 레이저 펄스용접은 짧은 펄스시간에 높은 밀도의 레이저를 투사하기 때문에 가공물에 급격한 온도변화를 발생시킨다. 매초마다 다수의 펄스가 투입되기 때문에, 짧은 간격으로 온도의 상승과 하강이 반복된다. 레이저 용접공정은 키홀(keyhole) 형성, 레이저의 흡수와 반사, 상변화, 온도 의존적인 물성치 변화 등의 복잡한 현상을 포함한다. 또한, 펄스출력, 펄스시간, 펄스주파수, 레이저 직경 등 다양한 용접변수들이 용접부의 형성에 영향을 미친다. 따라서 다양한 용접변수에 따른 포괄적인 물리적 현상을 이해하지 않고서는 레이저 용접특성을 파악하기 어렵다.
- [0017] 용접 제조산업에서 중대한 결함을 초래하는 가장 중요한 요인 중 하나는 용접에 의한 열변형이며, 이것을 최소화하기 위해서는 용접변수를 체계적으로 결정해야 한다. 그러나 일반적인 산업현장에서는 반복실험을 통해 경험의존적으로 용접변수를 선택하고 그에 따라 최적화된 용접품질을 기대하기는 어렵다. 또한, 경험의존적인 용접변수 채택방식은 초기설계 시 많은 시행착오를 통해 시간과 비용을 소모하게 된다. 이와 같은 이유로 몇몇의 연구자들은 실험을 통해 용접변수의 특성화에 대한 연구를 수행해왔다.
- [0018] 최근에는 보다 효율적인 레이저 용접공정의 최적화를 위해 용접부의 온도분포와 판재의 거동 등을 전산 모사하는 기술들이 개발되고 있다. 이러한 기술 중에는 연속용접이 아닌 펄스용접에서의 온도분포 예측기법을 유한요소 모델을 통해 제시하고, 이를 통해 시간에 따른 판재의 온도분포, 용융부(molten zone ; MZ)과 열영향부(heat affected zone ; HAZ)의 크기를 계산한다.
- [0019] 대부분의 용접해석에 관한 연구는 용접부의 온도분포를 예측하는 것을 목표로 한다. 특정한 용접형상을 모사하기 위한 열원모델 개발, 용접속도와 레이저출력 등의 용접변수에 따른 열원형상 예측 등이 주로 연구되어 왔다. 또한, 그 대부분의 연구에서는 용융부 형상만을 예측해보는 정도에 머물렀다. 최근에는 예측된 온도분포를 바탕으로 잔류응력 및 열변형을 분석하는 연구들이 수행되고 있다.
- [0020] 하지만, 레이저 펄스 심용접은 다양한 용접변수를 포함해 특성화하기 어려우며, 수초의 시간단위 동안 다수의 밀리세컨드 단위 펄스가 투입되기 때문에 해석의 효율성도 떨어진다. 이러한 어려움들 때문에 레이저펄스 심용접에 대한 용접부형상 예측 및 용접변형을 예측하는 일련의 과정을 분석한 연구는 보고된 바가 없다. 더군다나 지르칼로이-4 재료의 용접에 관한 수치해석적 연구는 미흡한 실정이다.
- [0021] 본 발명에서는 지르코늄 합금 특히 핵연료 지지격자의 주재료인 지르칼로이-4에 대한 레이저 용접시 Nd:YAG 펄

스레이저에 특성화된 수정 가우시안 열원모형을 이용하여 레이저 펄스변수에 따른 용접형상 및 그에 따른 열변형을 예측한다.

[0022] [지르칼로이-4의 재료 특성]

[0023] 일반적인 용접공정의 온도범위는 상온에서부터 용융점 이상까지 포함되기 때문에 온도에 따른 열적, 기계적 물성치 변화가 크다, 또한, 다수의 금속에서 상변화가 발생해 각 상마다 재료의 물성이 변화한다. 따라서 용접해석에서의 온도에 따른 물성치와 상변화 정보는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 하지만, 용융점 근처의 초고온에서는 물성치를 쉽게 획득하기 어렵기 때문에 많은 연구에서는 온도에 상관없는 물성치의 평균값을 대푯값으로 택해 해석한다. 최근에는 고온물성치를 획득할 수 있는 다양한 실험기술들이 개발되면서 온도 의존적 물성치를 이용한 용접해석이 연구되고 있다.

[0024] 레이저 용접해석에 필요한 재료 물성은 크게 2가지 그룹으로 나뉜다. 하나는 온도분포의 계산에 필요한 열전도도, 비열, 밀도와 같은 열전 물성이고, 다른 그룹은 기계적 거동의 계산에 필요한 탄성계수, 항복응력, 응력-변형률 선도, 열팽창률, 푸아송비 같은 기계적 물성이다.

[0025] [열원 모델]

[0026] 용접해석시 용접특성에 맞는 적절한 열원모형을 정의해 용융부와 열영향부의 모양과 크기를 결정한다.

[0027] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에 사용되는 수정 가우시안 모델 열원을 설명하기 위한 도면이다.

[0028] 도 1을 참조하면, 수정 원뿔형 가우시안 모델 열원분포는 다음의 식 [1]에 의해 표현될 수 있다.

$$Q = \frac{\eta P_p}{\pi r_e^2 z_e} \exp\left(-\frac{r^2}{r_e^2}\right) \exp\left(-\frac{z}{z_e}\right) + Q_1$$

식 [1]

[0030] 여기서, 우변의 첫째항은 용융부를 두 번째 항은 열영향부를 나타낸다. r_e , z_e 는 열원현상을 나타내는 상수 값으로 각각 열원의 반경과 높이를 나타낸다. 또한, η 는 보정계수로서 레이저 흡수율을, P_p 는 레이저 출력력을 나타낸다. Q_1 은 열영향부의 형상을 나타내는 항으로써 레이저 출력세기의 증가에 따라 커지는 값으로 조건별 상수이다. 이 열원모형은 레이저 출력(P_p)에 비례해 높아지는 열원밀도(Q)를 효과적으로 표현할 수 있다.

[0031] [수치적 모델링]

[0032] 레이저 용접해석은 크게 두 가지의 분리과정을 통해 계산된다. 먼저 열적 물성치를 바탕으로 열원이 가해졌을 때의 열전달 양상을 계산하게 된다. 열해석 결과물로서 시간에 따른 재료의 온도분포를 얻게 되고 이는 두 번째 과정인 기계적 해석의 입력값으로 정의된다. 기계적 해석에서는 열팽창, 항복에 의한 재료의 변형양상을 분석한다.

[0033] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에 사용되는 3차원 유한요소모델을 설명하기 위한 도면이다.

[0034] 도 2를 참조하면, 3차원유한요소모델은 용접해석을 위해 8절점요소와 6절점요소로 이루어진다. 이때, x, y, z 는 직교좌표이며, y 축은 용접 진행방향, z 축은 재료표면에 수직인 방향이다.

[0035] 3차원 유한요소모델은 예를 들면, 58600개의 절점과 49220개의 요소로 이루어져 있다. 용접공정은 총 38번의 펄스 레이저가 투입되며 이를 모사하기 위한 y 축을 따라 38개의 1차원 펄스요소를 생성한다. 레이저가 투합되는 용접선(welding line)에서는 아주 짧은 펄스시간에 큰 온도변화가 일어난다. 또한, 용융부와 열영향부가 형성되며 상변화가 발생한다. 따라서, 용접선 부근에는 매우 조밀한 요소망을, 그 외에는 해석효율을 위해 성긴 요소를 생성한다.

[0036] [레이저 펄스 모델]

[0037] 펄스용접은 점용접이 일정한 간격을 두고 불연속적으로 이루어지는 용접방법이다. 펄스용접은 연속용접에 비해 용융부 및 열영향부가 작으며 그에 따른 열변형이 작다. 따라서 정밀함이 요구되는 여러 산업분야에서 그 사용빈도가 높아지고 있다. 하지만, 펄스용접은 ms 단위의 짧은 타임 스텝(time step)과 조밀한 모델생성이 요구되어, 많은 양의 전산처리를 해야 하는 어려움이 있다.

[0038] 펄스용접은 연속용접과는 달리 많은 용접변수의 조합으로 구성되어 있다. 펄스용접과 관련된 용접변수는 레이저 출력(P_p), 펄스지속시간(T_p), 펄스 간 시간(T_f), 오버랩(Overlap)(%), 용접속도(V)가 있다.

[0039] 펄스변수들 간의 상관관계 및 이에 대한 개략도는 도 3에 나타내었다.

[0040] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 레이저 점 용접의 구조를 설명하기 위한 도면이다. 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 레이저 펄스 용접의 유한요소모델을 설명하기 위한 도면이다.

[0041] 도 3 및 도 4를 참조하면, 레이저 펄스모델은 포트란 코드(FORTRAN code)를 활용한 타임 평선(time function)을 통해 이러한 모든 용접변수들을 고려해 나타낼 수 있도록 개발되었다. 펄스길이는 VT_p 로 표현되며, 펄스 간 거리는 VT_f 로 정의된다. 펄스 레이저가 투입되는 구간의 타임 스텝은 매우 조밀하게 구성되어 큰 온도변화를 모사할 수 있도록 하고, 펄스가 투입되지 않는 구간에서는 해석시간의 단축을 위해 상대적으로 긴 타임 스텝으로 구성한다. 심용접을 바탕으로 하는 펄스 용접모델을 도 4에 나타내었다. 불연속적인 다수의 용접선을 생성해 오버랩의 비율을 결정할 수 있다.

[0042] 펄스용접의 특성 중 하나는 연속용접에 비해 상대적으로 적은 에너지를 사용해 용접할 수 있다는 점이다. 펄스 출력을 단위시간 당의 출력으로 계산한 평균출력은 다음의 식[2]와 같이 정의할 수 있다.

$$P_{av} = \frac{P_p \times T_p \times f}{1s} = \frac{E_p \times f}{1s} \quad \text{식 [2]}$$

[0044] 펄스변수가 1kW의 펄스출력, 5ms의 펄스시간, 5Hz의 펄스주파수로 주어진다면, 평균출력은 25W가 된다. 하지만, 연속용접으로 비슷한 크기의 용접부를 생성하기 위해선 약 125W의 평균출력이 필요하다. 즉, 펄스용접이 연속용접에 비해 약 4배의 용접효율을 보이게 된다.

[0045] 개발된 레이저 펄스용접모델의 유효성을 검증하기 위해 기초용접실험을 수행했다. 용접실험은 Nd:YAG 레이저 장치로 수행되었다. 도 2와 같이, 시편의 Y축의 중앙부를 따라 용접되었다. 용접시 산화를 방지하고자 용접선을 따라 10L/min 속도로 질소 가스가 분사되었다. 시편은 끝단에서 10mm 만큼 떨어진 지점을 고정시켜 용접에 따른 열변형의 측정을 용이하게 했다. 각 용접조건에 따라 3회씩 실험했으며, 각각의 열변형을 광학현미경을 통해 관찰했다.

[0046] Nd:YAG 레이저 장비의 용접변수로는 레이저출력(P_p), 펄스시간(T_p), 펄스주파수(f), 용접속도(V), 레이저직경(d)가 있다. 본 발명에서는 레이저 직경을 0.6mm로 고정했으며, 펄스간 거리를 0.4mm로 고정함으로써 용접속도를 펄스주파수에 관한 함수, fV 로 정의했다. 따라서 용접실험은 레이저출력, 펄스시간, 펄스주파수 3가지 변수를 바탕으로 수행했다. 각 변수에 따른 용접부 형상과 그 형상에 따른 열변형량을 분석했다.

[0047] 본 발명에서 분석한 레이저 용접 시스템은 3.71초 동안 총 38개의 펄스 레이저를 투입한 후 20초 동안 상온으로 냉각된다. 냉각시간 20초는 시편이 상온까지 냉각되는데 필요한 최소한의 시간이다.

[0048] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 용접과정 중에 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)가 형성되는 것을 설명하기 위한 도면이다.

[0049] 도 5를 참조하면, 시간에 따라 레이저 심용접이 형성되는 과정이며, 펄스레이저가 투입될 때마다 용융부와 열영향부가 진전된다. 일반적인 아크용접은 열원이 지나간 후에도 열영향부의 확산 및 열변형이 진행되지만, 레이저 용접의 경우 펄스와 펄스 사이의 시간 동안 열영향부의 확산 및 열변형이 끝난다. 그것은 용접에 필요한 입열량이 상대적으로 적기 때문이다. 시편 끝단에서는 용융부 및 열영향부가 확산된다. 이는 축적열 및 레이저로 투입된 열이 더 이상 확산될 재료가 남아 있지 않기 때문이다.

[0050] [펄스 출력(Pulse power)]

[0051] 본 발명에서 개발된 용접해석 시스템과 용접실험을 비교분석시 용접부 형태가 동일한 조건에서 비교가 이루어져야 한다. 따라서, 동일한 용융부를 나타내는 펄스출력에 관한 하나의 대표변수를 정의할 필요가 있다. 펄스출력에 관한 변수는 출력세기($P_p(W)$)와 펄스지속시간($T_p(ms)$), 펄스에너지($E_p(J)$)가 있으며, 각각의 변수사이에는 다음의 식[3]이 존재한다.

$$E_p = P_p \times T_p$$

식[3]

실험결과, 일정 펄스에너지 조건에서는 펄스지속시간이 짧아지고 출력세기가 커질수록 용접부 크기가 증가하는 경향을 나타냈으며 일정 펄스지속시간에서는 출력세기와 펄스에너지가 증가할수록 용접부 크기가 증가하는 경향을 나타냈다. 이 두 결과를 통해 펄스에너지, 펄스지속시간은 동일한 용융부를 나타내기 위한 대표변수로써 적절하지 않음을 알 수 있다.

레이저 출력밀도(P_D)는 용융 형태 및 용접 품질을 좌우하는 중요한 변수 중 하나로 알려져 있다. 레이저 출력밀도(P_D)는 다음의 식 [4]와 같이 정의할 수 있다.

$$P_D = \frac{P_p}{S} = \frac{E_p}{T_p \times S} \text{ (W/mm}^2\text{)}$$

식[4]

S는 레이저 넓이이며, 레이저 직경이 고정되었다고 가정하면 레이저 출력밀도는 레이저 출력세기와 비례한다. 따라서 용융형태에 가장 중요한 영향을 미치는 레이저 대표변수로써 레이저 출력세기를 결정한다.

상술한 식 [1]과 같이 수정 가우시안 열원모델의 크기는 레이저 출력세기에 비례한다. 모델의 형상과 관련된 변수인 r_e 는 그 크기가 커질수록 용융부의 폭이 증가하는 경향을 보이고, z_e 는 커질수록 용융부의 깊이가 커지는 경향을 보인다.

출력세기에 따른 용접실험은 5ms의 펄스시간, 5Hz의 펄스주파수의 조건에서 출력세기를 600W~1500W까지 150W씩 증가시켜 용접실험을 수행한 결과, 출력세기에 따른 용접실험 및 용접해석에서의 용접부형상을 도 6에 나타냈다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스출력에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

도 6을 참조하면, HAZ-Top은 시편 윗면의 열영향부 폭, HAZ-Bottom은 시편 아랫면의 열영향부 폭, 그리고, MZ는 용융부의 폭을 나타낸다. 펄스출력의 크기에 의존적인 MZ는 펄스출력의 증가에 따라 증가하며, 펄스에너지에 의존적인 열영향부 또한 증가한다. 출력세기가 클 경우 펄스 에너지가 증가하므로 때문에 용융부의 열영향부가 증가하는 것은 자명하며, 그 변화율은 출력세기에 비례했다. 결과적으로 용접실험과 매우 유사한 해석해를 도출할 수 있었다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스출력에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 z방향 변형량 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

도 7를 참조하면, 1.05kW를 기준으로 변형량이 증가했다가 다시 감소하는 경향을 보인다. 용접과정 중 레이저가 직접적으로 투하하는 부분에서는 재료의 용융이 발생한다. 용융이 일어나면 열팽창에 의해 축적된 변형률이 0이 된다. 따라서 용접 후의 수축과정에서 용융부 방향으로 재료가 수축되면서 레이저가 투하된 면으로 변형이 발생하게 된다. 0.9kW의 출력세기 이전에는 열영향부 범위가 너무 작아 수축되는 재료가 작아 변형이 적게 일어난다. 하지만 열영향부가 시편하단까지 확산되는 시점 이후로는 열영향부의 분포가 z-방향으로 평행한 방향으로 변화한다. z-방향으로의 열영향부 분포가 일정해지므로 변형량이 점차 감소하는 경향을 보이게 된다. 따라서, 용접변형을 최소화하려면 HAZ의 변형량을 크게 하는 것이 유리하다.

[펄스 시간(Pulse duration)]

용접실험시 특정 펄스지속시간 이상시 일정한 출력밀도에서는 용접 깊이와 폭이 모두 수렴한다.

펄스시간에 따른 용접실험은 1kW의 펄스출력, 5Hz의 펄스주파수의 조건에서 펄스시간을 2ms~10ms까지 2ms씩 증가시키며 용접실험을 수행했다. 펄스시간에 따른 용접실험 및 용접해석에서의 용접부 형상을 도 8에 비교해 나타냈다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스시간에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

도 8을 참조하면, 일정한 펄스출력 조건에서 펄스시간이 커지면 펄스에너지가 커져 열영향부의 크기가 증가했으며, 시편 상단과 하단의 열영향부 폭의 차가 줄어드는 경향을 보인다. 반면, 용융부의 경우 펄스시간이 증가함

에 따라 입열량이 많아짐에도 불구하고 거의 변하지 않는다(4ms 이상). 투입되는 열원 밀도가 일정한 경우, 온도가 높아질수록 전도, 대류, 복사에 의한 열손실이 모두 커지기 때문에 일정한 온도에 도달하면 에너지 준평형 상태가 되어 더 이상 용융부가 커지지 않게 된다. 반면 입열 에너지가 전도에 의해 확산되어 열영향부는 커지는 것으로 파악된다. 즉 용융부 크기는 펄스시간에 따라 변하지 않으며, 펄스 출력에 의존한다는 것을 알 수 있다. 수정 가우시안 모델을 이용한 용접해석에서도 펄스시간만을 변화시켜가며 해석을 수행했고, 실험과 유사한 용접 형태를 보였다.

[0068] 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스시간에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 z방향 변형량 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

[0069] 도 9를 참조하면, 4ms부터 10ms까지는 펄스시간 증가에 따라 변형량이 감소했다. 이는 펄스시간증가에 따라 펄스에너지가 증가했고 그에 따라 열영향부가 넓어졌으며, 시편 상단과 하단의 열영향부 분포가 일정해졌기 때문이다. 2ms 에서는 열영향부의 크기가 상대적으로 재료의 수축이 충분치 않아 변형량이 작게 나타났다.

[0070] [펄스 주파수(Pulse frequency)]

[0071] 펄스주파수에 따른 용접실험을 1.2kW의 펄스출력, 5ms의 펄스시간의 조건에서 펄스주파수를 1Hz~9Hz까지 2Hz씩 증가시키며 용접실험을 수행했다. 펄스주파수에 따른 용접실험 및 용접해석에서의 용접부 형상을 도 10에 비교하여 나타냈다.

[0072] 도 10은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스주파수에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

[0073] 상술한 카테고리 [펄스 출력]과 [펄스 시간]에서 분석한 내용을 토대로 하여 도 10을 참조하면, 펄스에너지가 일정하기 때문에 시편 상단의 열영향부 폭이 일정하며, 펄스출력이 일정하기 때문에 용융부의 폭이 일정하다가 볼 수 있다. 반면, 펄스주파수가 높아질수록 펄스와 펄스사이의 시간(T_f)이 짧아져 상대적으로 온도가 하강할 수 있는 폭이 작아진다. 따라서, 시편의 전체적인 온도분포가 상승하고 열영향부가 시편의 뒷면까지 확장된다.

[0074] 도 11은 본 발명의 실시예에 따른 지르코늄 합금 박판의 레이저 용접 변형 예측 시스템에서 펄스주파수에 따른 용융부(MZ)와 열영향부(HAZ)의 z방향 변형량 변화를 설명하기 위한 그래프이다.

[0075] 도 11을 참조하면, 펄스주파수에 따른 용접형태는 시편윗면의 용융부 및 열영향부의 폭은 일정하며 시편 아랫면의 열영향부폭만 변화한다. 마찬가지로, 펄스주파수가 높아질수록 열영향부의 분포가 z축에 평행한 방향으로 변화하며 그에 따라 변형량이 점차 감소하는 경향을 보인다.

[0076] 펄스출력 조건에서 펄스시간이 증가함에 따라 펄스에너지가 증가하기 때문에 열영향부의 크기가 증가했으며, 시편 상단과 하단의 열영향부 폭의 차가 줄어드는 경향을 보인다.

[0077] 최근 원자력 발전량의 약 80% 이상이 가압경수로 의해 생산된다.

[0078] 지지격자체는 가압경수로에서 수백 개의 연료봉을 지지하도록 설계된 핵심 구조물이다. 지르칼로이-4는 고온에서 높은 내식성, 내마모성 및 파괴인성 등의 특성으로 지지격자의 주재료로 사용되며, 각각의 지지격자는 용접을 통해 접합된다. 용접에 의한 지지격자체의 열변형은 제품 불량률의 주요원인이 된다. 변형량이 설계 한도를 만족시켜야 연료봉을 건전하게 지탱할 수 있다. 따라서, 레이저 용접에 의해 지지격자체의 변형량을 최소화시키는 것이 가장 중요한 공정 중 하나이다.

[0079] 본 발명에서는 지지격자의 용접공정에 사용되는 Nd:YAG 레이저를 전산모사할 수 있는 유한요소모델을 구현함으로써 지지격자체 원자재인 지르칼로이-4 판재의 상변화 특성 및 온도에 따른 물성변화를 고려할 수 있다. Nd:YAG 레이저 특성에 부합하는 수정 가우시안 모델을 용접변수와 연관지어 정량적으로 제시함으로써 유한요소 모델은 펄스시간(T_p), 펄스주파수(f), 펄스출력(P_p), 레이저직경(d) 등의 레이저 용접변수를 고려한 용접해석이 가능하다. 또한, 용접실험에 필요한 시편제작 및 실험법을 구축하고 용접실험을 통해 개발한 해석모델링의 유효성을 검증했다.

[0080] 결과물로서 용접형상과 그에 따른 변형량을 예측했고 레이저 용접변수와 용접형상 그리고 변형량 사이에는 밀접한 관계가 있음을 확인했다. 용융부 크기에 결정적으로 영향을 미치는 용접변수는 펄스출력이다. 펄스시간에는 큰 영향 없이 용융부의 크기가 펄스출력에 비례하여 커지는 것을 확인했다. 또한, 용접부의 열영향부 크기에 결정적으로 영향을 주는 변수는 펄스에너지였다. 열변형량은 용접부의 형태, 특히 열영향부의 크기에 따라 변화하는 것을 확인했다. 펄스에너지가 일정량(대략 4J/pulse)이 될 때까지는 변형이 증가한다. 그 이유는 용접부가 확대

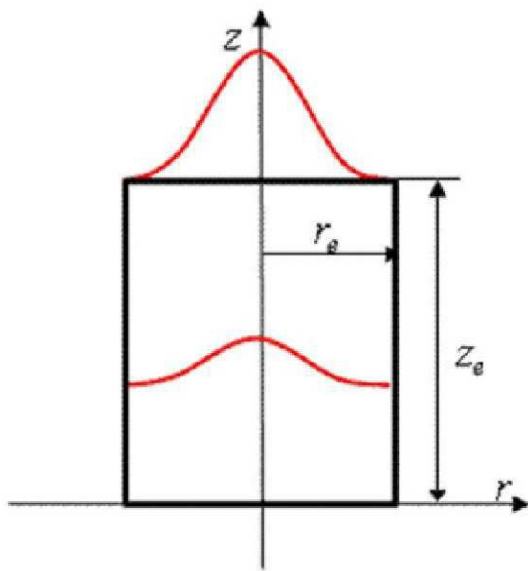
됨에 따라 표면 방향으로 수축되는 재료의 양이 증가하기 때문이다. 하지만 펄스에너지가 일정수준을 넘어서면, 열영향부기 시편의 하단까지 도달하며 z 축 방향에 평행하게 배열된다. 따라서 z 축 방향 변형이 줄어들게 된다. 지지격자체를 포함한 용접구조물에서 용접변형을 최소화하기 위해서는 열영향부가 크게 형성되어야 한다.

[0081]

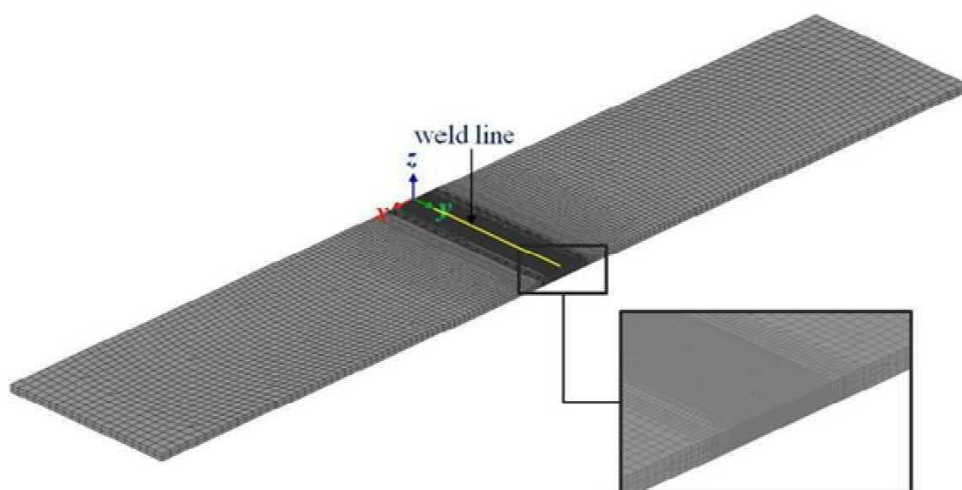
반면 레이저 성형과 같이 변형을 목표로 하는 공정에서는 열영향부가 시편 하단까지 확산되는 시점을 기준으로 최대변형량이 형성될 것이다. 펄스용접해석모델을 기반으로 용접부 형상 및 변형량을 예측하는 기법을 개발하였고, 이를 확장해 향후 개발될 새로운 지지격자체 모델에 최적화된 레이저 용접공정을 설계할 수 있는 가능성을 제시했다.

도면

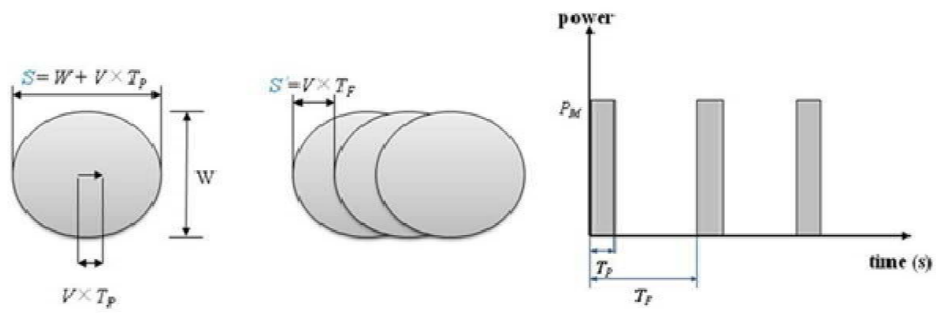
도면1



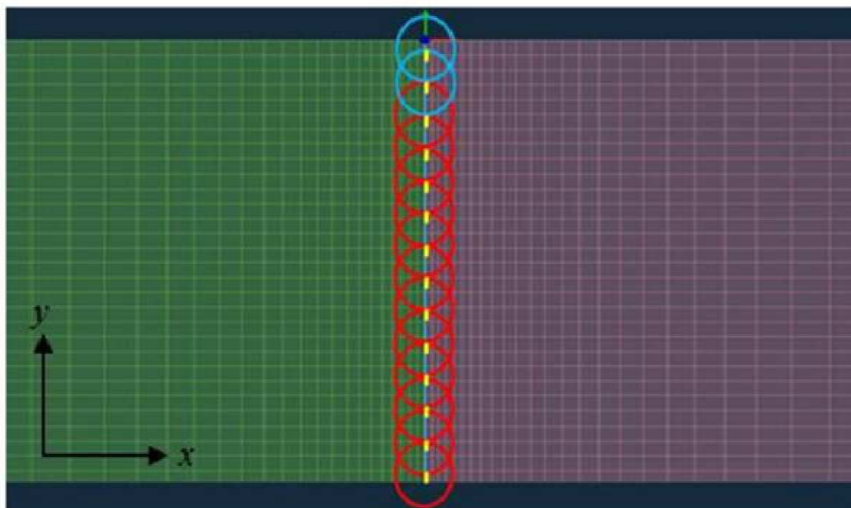
도면2



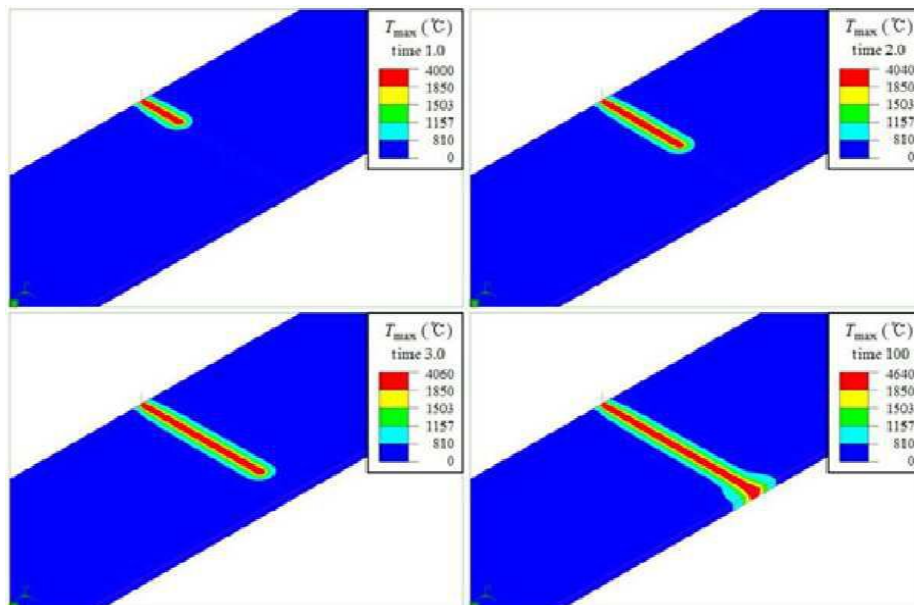
도면3



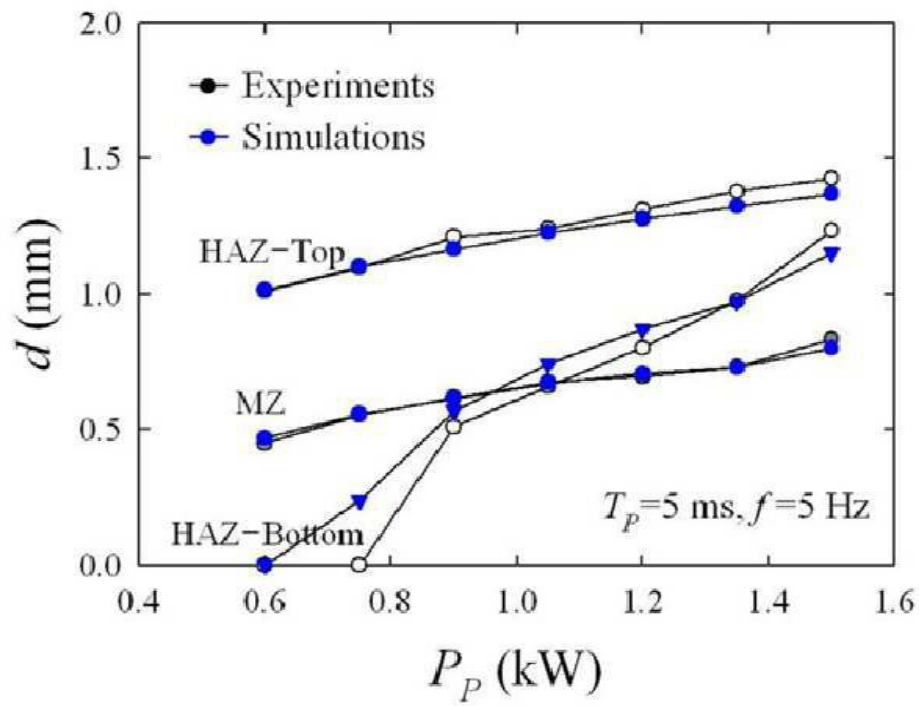
도면4



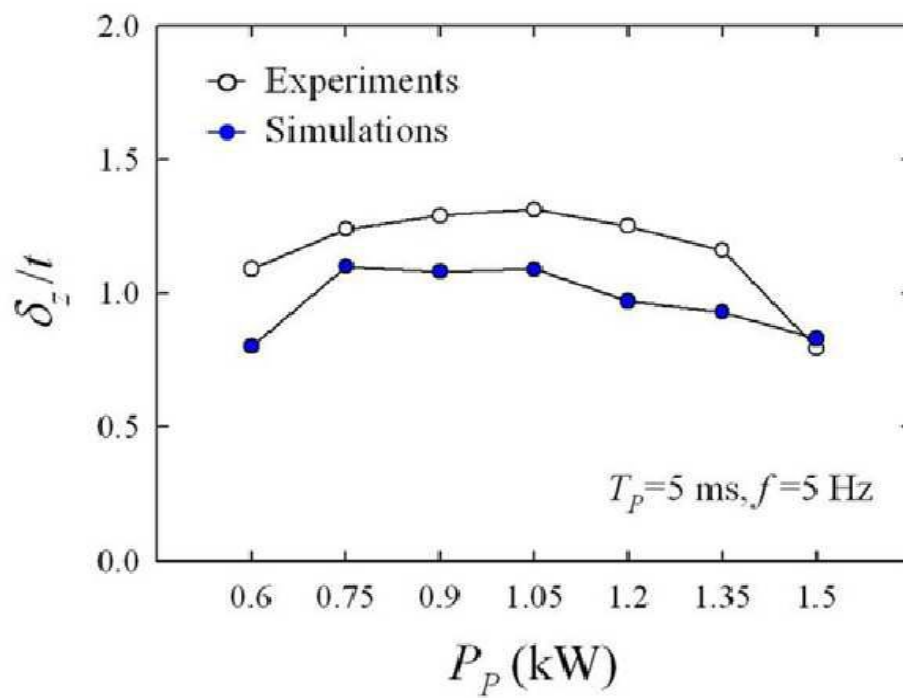
도면5



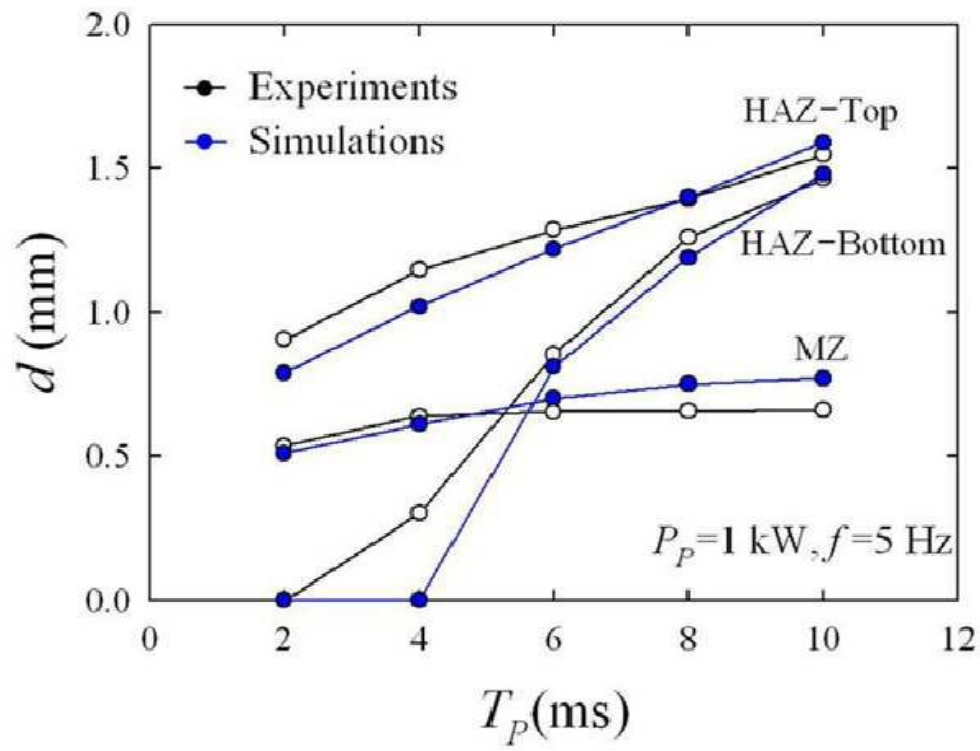
도면6



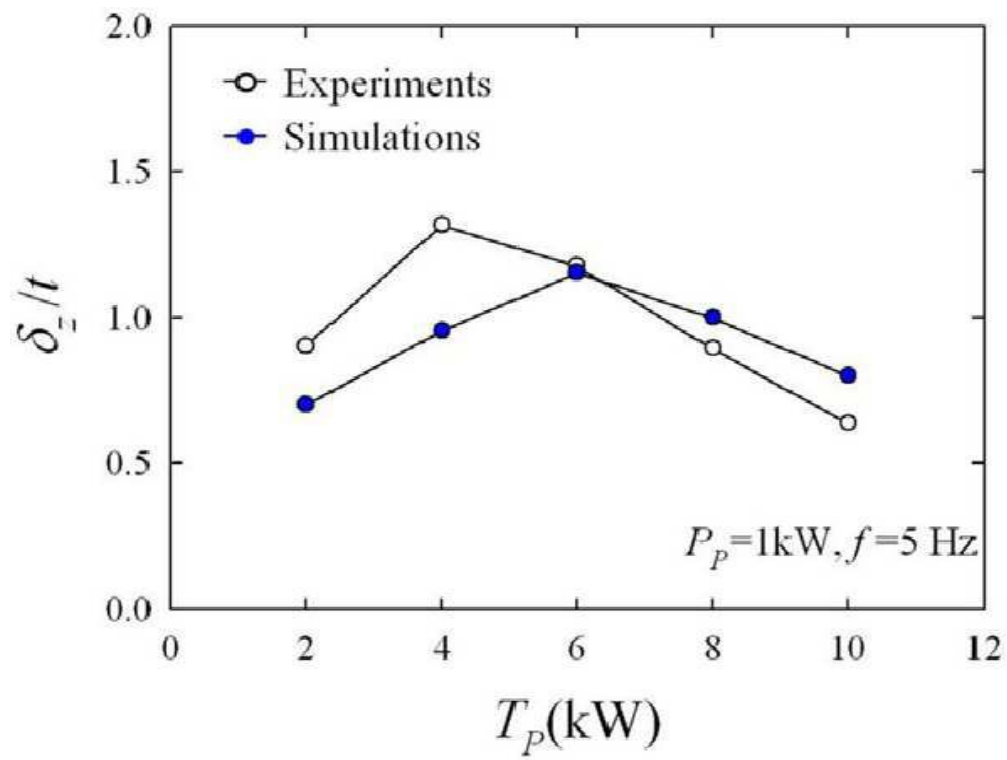
도면7



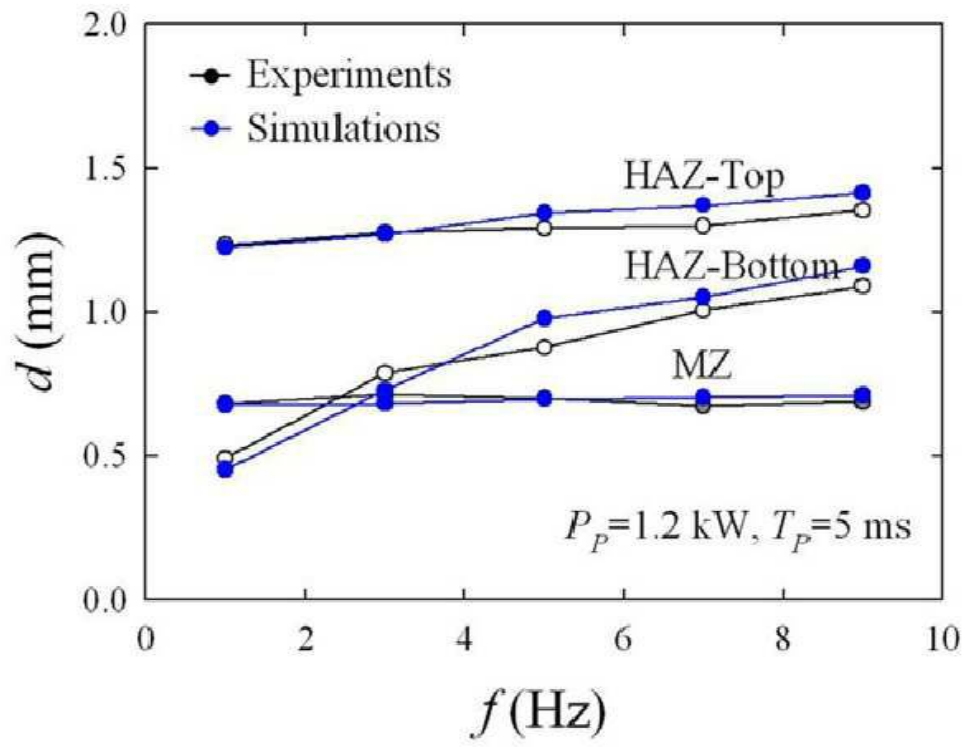
도면8



도면9



도면10



도면11

