

초음파 펄스 서모그래피를 이용한 용접 결함 검출

조재완 · 정진만 · 최영수 · 정승호 · 정현규

A Welding Defect Inspection using an Ultrasound Pulse Thermography

Jai-Wan Cho, Chin-man Chung, Young-Soo Choi, Seung-Ho Jung and Hyun-Kyu Jung

1. 서 론

균열 또는 접합면의 결함 등이 존재하는 물체에 고에너지(2kW) 초음파(20kHz)를 입사시키면 균열, 결함부위의 표면에서 국부적인 열이 발생한다¹⁻³⁾. 초음파가 물체의 균열, 박리 등의 결함 부위를 통과할 때 서로 맞닿은 결함 면은 균일하게 진동하지 않는다. 결함 면 사이의 마찰, 문지름(rubbing) 또는 부딪침(clapping) 현상이 진동 에너지의 일부를 열로 변환시킨다. 이러한 열을 적외선 열 영상 카메라로 관측하면 물체 내에 존재하는 결함을 신속하게 검출할 수 있다. 물체에 초음파 여기 진동에너지를 인가하여 결함부위에서 국부적으로 발생하는 열을 적외선 열 영상 카메라로 관측 진단하는 것을 초음파 여기 서모그래피라 한다⁴⁾. 초음파 서모그래피를 이용한 비파괴 결함진단은 주로 항공기, 자동차 등의 복합재료의 결함검출에 사용되고 있다⁵⁻⁶⁾.

본 논문에서는 초음파 여기 서모그래피를 이용한 알루미늄 용접 용기의 결함 검출에 대해 기술한다. 알루미늄은 중성자에 대해 투명(transparent)하므로 원자력 시설의 중성자 계측용 센서의 밀봉 용기 재료로 이용되고 있다. 밀봉 용기에 결함이 있으면 물이 침투하여 센서의 오동작이 유발된다. 초음파 여기 진동에너지 입사에 따른 알루미늄 용접 심 라인의 결함 부위에서의 국부적인 발열(핫 스팟)을 적외선 열 영상 카메라로 관측, 검출하였으며 이를 침투 탐상 검사 법으로 확인하였다.

2. 초음파 서모그래피의 원리

Fig. 1은 초음파 서모그래피의 원리를 나타내고 있다. 초음파 여기를 이용한 서모그래피 기법의 비파괴 진단에서는 아주 짧은 초음파 펄스(펄스폭: 50~300ms, 주파수: 20~40kHz)를 검사 시편에 인가하

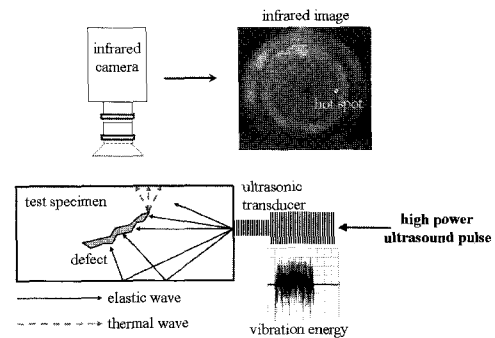


Fig. 1 Principle of ultrasound excited thermography

여 결함 부위에서 국부적인 열이 발생되도록 한다. 적외선 열 영상 카메라는 초음파 펄스 인가 전, 후의 시간 경과에 따른 결함 부위의 발열 현상의 진행상황을 기록 저장하고 이를 디지털 영상 처리하여 검사 시편의 결함을 찾아낸다⁷⁾. 초음파 입사에 의한 탄성파가 결함 부위에 도달함과 동시에 발열현상이 나타나므로 이를 열 영상 카메라로 관측하면 초음파 진동 에너지를 구조물에 인가한 후 수십 ms 이내에 밝은 패턴이 관측된다. 20kHz 대역 주파수의 초음파는 수십 cm의 파장 성분을 갖는다. 또한 파장 길이보다 훨씬 먼 거리를 진행할 경우에도 초음파는 충분한 진폭 에너지를 가지면서 전파된다. 이는 재료에 손실이 없을 경우 초음파는 감쇄 없이 수 파장 길이의 거리를 전파할 수 있다는 것을 의미한다. 고체에서 음속의 속도는 수 km/s이다. 초음파 여기 펄스가 인가되는 순간에 본 논문에서 사용한 시편의 크기를 갖는 재료의 전 검사 영역을 음장(sound field)이 완전히 투과한다는 것을 의미한다. 수 kHz 대의 영상 획득시간을 갖는 초 고속 적외선 열상 카메라를 이용할 경우 수십 μ s 이내의 빠른 시간에 결함을 검출할 수 있다. 한편, 고체에서 음향 진폭 감쇄는 음파 주파수의 제곱에 비례한다⁸⁾. 주파수가 높을수록 초음파 여기에 의한 진동 진폭이 낮아진다. 따라서 구조물의 결함부위에서의 발열을 효과적으로 여기하기

위해 가청 주파수의 경계에 위치하는 15 kHz~40 kHz 대역의 여기 주파수를 사용하며 일반적으로 20 kHz 대역이 널리 사용된다. 전극에 인가되는 고전압을 고주파수로 발진시키면 발진 주파수에 대응하여 압전소자의 길이가 변화하므로 기계적인 진동이 여기된다. 초음파 진동에너지를 여기에 따른 결합부위에서의 선택적 발열 현상을 적외선 열 영상 카메라로 관측하여 기록 저장한다.

3. 실험 방법

Fig. 2 에 실험 장치를 보이고 있다. 알루미늄 용기를 바이스에 고정하여 초음파 트랜스듀서의 가진에 의해 시편이 이탈되는 것을 방지하였다. 본 논문에서 사용한 초음파 트랜스듀서는 플라스틱 용접 등에 사용하는 용착기용 진동자 ULW 6520B 모델을 사용하였다. 이 모델은 압전 세라믹 6개가 적층으로 되어 있으며 ± 전극이 교대로 연결되어 있고 20kHz의 진동주파수를 가진다. 사용된 적외선 열 영상 카메라 (IR-M500) 은 Stirling Cooling 방식의 냉각형 열영상 카메라이고 3~5 μ m 파장대의 스펙트럼 특성을 갖고 있다. 센서는 쇼트키 배리어 방식의 FPA(Focal Plane Array) PtSi (Platinum Silicide) 소자이며 512×512 크기의 픽셀 수를 갖고 있다. 센서 어레이의 실제 크기는 0.52"×0.4"이며 한 픽셀의 공간 분해능은 25.8×19.8 μ m이다. 적외선 열영상 카메라 신호는 NTSC 타입의 아날로그이므로 이를 디지털화하여 컴퓨터에 동영상으로 기록 저장한다. Image Recording System은 NTSC 타입의 아날로그신호를 IMAGING SOURCE 사의 Video to 1394 Converter를 통해 640×480 크기의 32bit RGB 신호로 변환하여 동영상 압축 코덱을 통해 동영상으로 저장하고 컴퓨터 모니터에 디스플레이한다. 저장된 동영상은 DirectShow SDK와 OPENCV를 이용하여 처리하였다. Fig. 3에 실험에 사용한 알루미늄

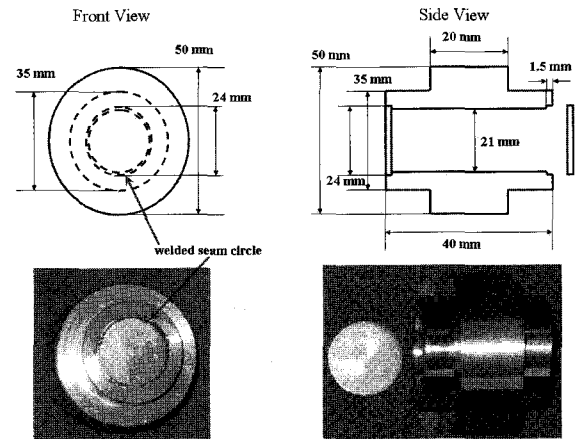


Fig. 3 A schematic dimension of aluminum receptacle

용기시편의 크기를 나타내고 있다. 24×1.5mm(직경×두께) 크기의 알루미늄 원판을 용기 내면에 Nd:YAG 펄스 레이저로 용접하였다. Fig. 4에 초음파 서모그라피를 이용한 용접면 결합 관측의 개요를 나타내고 있다.

시편과 접촉하는 초음파 트랜스듀서의 단면은 직경이 10mm이다. 접촉 면적에서 보면 초음파 트랜스듀서 단면과 용접 시편의 판면을 접촉시키는 것이 효율적이다. 그러나 초음파 트랜스듀서의 기둥 부분이 적외선 열 영상 카메라의 관측 시야를 제한하므로 용접 판면의 전체를 관측할 수 없다. 초음파 서모그라피를 이용한 비파괴 검사에서는 초음파 트랜스듀서와 시편과의 접촉면적의 크기 보다는 시편과 초음파 트랜스듀서 사이에 인가되는 적절한 힘이 결합 관측의 효율을 증대시키는 것으로 알려져 있다⁹⁾.

초음파 여기 진동에너지 입사에 따른 용접 판면의 전체를 관측하기 위해서 Fig. 4에 나타내고 있는 바와 같이 알루미늄 용기의 외면과 초음파 트랜스듀서의 단면을 접촉시켰다. 이 경우에는 선 접촉이 된다. 적외선 열 영상 카메라는 용접 판면의 정면에 위치하고 있으므로 초음파 펄스 가진 시의 알루미늄 용접 판면 전체의

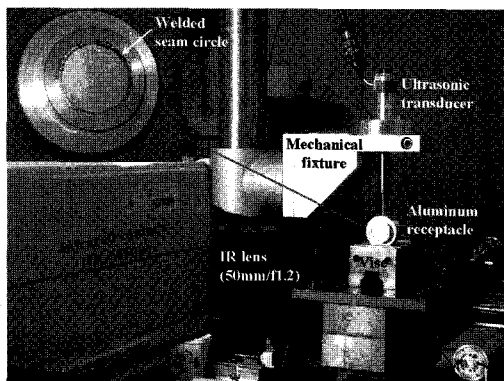


Fig. 2 A photograph of the experimental setup

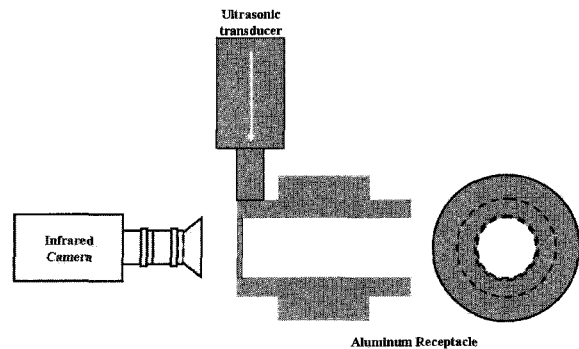


Fig. 4 A schematic diagram of ultrasound excitation experiment of aluminum receptacle

열적 특성을 관측할 수 있다. 펄스폭이 280ms 인 초음파 진동 펄스를 알루미늄 용기의 외면에 입사시켰다. 한편, 시편과 초음파 트랜스듀서의 결합효율을 높이고, 가진 시 초음파 트랜스듀서 단면과 시편 표면과의 마찰에 의해 시편이 손상되는 것을 방지하기 위한 촉매(couplant)로 종이를 사용하였다. 적외선 열 영상 카메라로 표면 연마된 알루미늄 재질을 관측할 경우 반사에 의한 영향을 고려해야한다. 키르히호프 법칙에 따르면 물체의 반사율(reflectivity)과 방사율(emissivity)의 합은 1 이다. 금속 재질의 방사율은 표면 연마 상태에 따라 차이가 나지만 0.1이하이다. 이는 반사율이 0.9이상으로 주변 열원의 반사에 민감하다는 것을 나타낸다. 본 실험에 사용한 초음파 트랜스듀서도 STS 재질로 반사율이 높다. 초음파 입사 시에 초음파 트랜스듀서와 시편과의 접촉면에서 발생하는 마찰열이 주변 구조물에 의해 반사되어 검사시편의 표면에 나타날 수 있다. 관측되는 적외선 열 영상에서 나타나는 핫 스팟 들이 결합 자체의 발열 특성인지 아니면 시편과의 접촉면에서 발생한 마찰열이 주변 구조물에 반사되어 나타나는 열 특성인지를 구분하는 것이 중요하다. 주변 열원이 구조물에 반사되어 검사 시편에 나타나는 것을 방지하기 위해 방사율이 낮은 금속시편은 방사율이 1.0 에 가까운 검은색 페인트를 시편 표면에 도포하여 검사를 하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 시편에 페인트를 도포하지 않고 초음파 펄스를 여러 각도에서 입사시켜 반사에 의한 영향을 구분하려고 하였다. 시편의 표면에서 관측되는 열(핫 스팟)이 반사에 의한 것 인지 결합 자체의 발열인지를 구분하기 위해 Fig. 5와 같이 두 방향으로 초음파를 검사 시편에 각각 가진 시켰다. Fig. 5(a)는 용접 결함의 위치가 초음파 트랜스듀서와 시편의 접촉면과 동일 축 상에 있을 경우를 나타내고 Fig. 5(b) 는 용접 결함추정 위치가 초음파 트랜스듀서의 가진 점

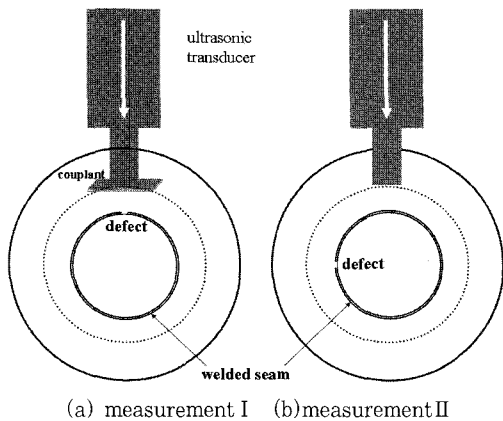


Fig. 5 Ultrasonic excitation point of the aluminum welded receptacle

로부터 반시계방향으로 90° 치우쳐 위치하고 있음을 나타낸다. Fig. 5(a) 경우에 280ms 펄스폭의 초음파 진동 에너지를 알루미늄 용기의 외면에 인가하기 전후의 용접 관면의 열적 특성을 적외선 열 영상카메라로 관측한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 중간에 보이는 기둥이 초음파 트랜스듀서이다. Fig. 6을 보면 3개의 핫 스팟들이 관측되고 있다. Fig. 7은 Fig. 6에서 관측된 3개의 핫 스팟들의 윤곽선을 추출하고 이를 5배로 확대한 영상을 나타내고 있다. Fig. 6과 7에서 상단에 있는 가장 큰 핫 스팟은 초음파 트랜스듀서 단면과 시편이 접촉하는 면으로 초음파 가진 시의 마찰열이다. Fig. 7의 하단에 있는 핫 스팟은 초음파 가진 시의 마찰 열이 결합재로 사용한 종이에 의해 굴절되어 시편의 표면에 반사되어 나타나는 것으로 추정된다. Fig. 7의 중앙에 있는 작은 핫 스팟이 용접 선의 결합(균열)에 의한 발열 특성이다. 이를 확인하기 위하여 Fig. 5(b) 와 같이 초음파 가진 방향을 다르게 하여 결합 영상을 관측하였다. 초음파 트랜스듀서 단면과 시편사이에 결합재를 사용하지 않으므로 해서 초음파 가진 시의 마찰 열이 결합재에 의해 반사되어 알루미늄 용기 시편의 표면에 영향이 미치는 것을 차단하였다.

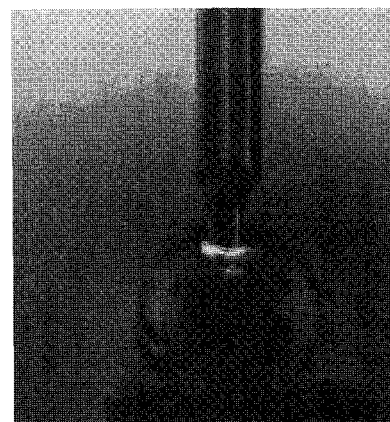


Fig. 6 Thermosonic image of a surface of Al receptacle (measurement I)

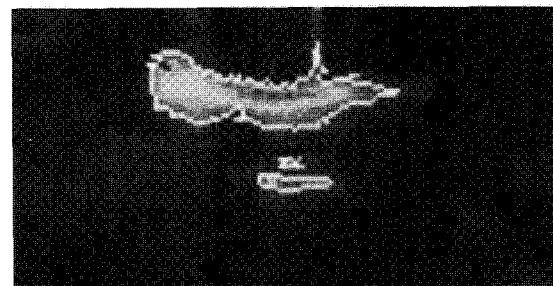


Fig. 7 Magnification image of hot spot areas in Fig. 6

Fig. 8에 Fig. 5(b) 경우 초음파 가진 시의 관측 열 영상을 나타내고 있다. Fig. 8의 중앙에 보이는 핫 스폿은 초음파 트랜스듀서와 시편과의 접촉면에서 발생하는 마찰열이다. Fig. 8의 좌측하단에 균열로 추정되는 결합의 핫 스폿이 선명하게 관측되고 있음을 알 수 있다.

초음파 트랜스듀서와 시편사이에 결합재를 제거하였을 경우 반사의 영향이 없음을 알 수 있다. 초음파 서모그라피를 이용한 비파괴 검사 기법은 지문 탐상 검사, 액체 투과 검사에 비해 실시간 검사가 가능하고 검사자에 대한 의존성이 적으며 표면하 결합도 검출이 가능하다. 본 논문에서는 초음파 서모그라피로 검출한 균열을 검증하기 위하여 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 액체 투과 검사를 수행하였다. 알루미늄 용기에 푸른색의 수성 잉크를 담은 후 시간 경과에 따른 누설을 CCD 카메라로 관측하였다.

Fig. 10(a)는 염료를 투입하기 전의 관측 영상을 나타내고 있다. Fig. 10(a)에서 좌측 하단에 검은색으로 표시한 원형은 초음파 서모그라피 검사에 의해 발견된 결합(균열) 위치를 나타내고 있는 것이다. Fig. 10(b)는 염료를 투입한 후 10 여초 경과한 후의 관측 영상

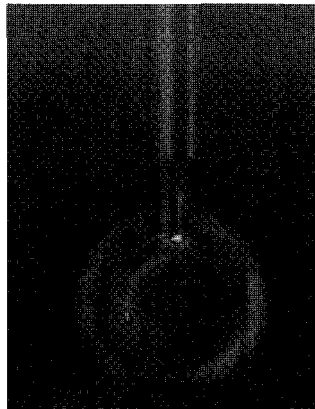


Fig. 8 Thermosonic image of a surface of Al receptacle (measurement II)

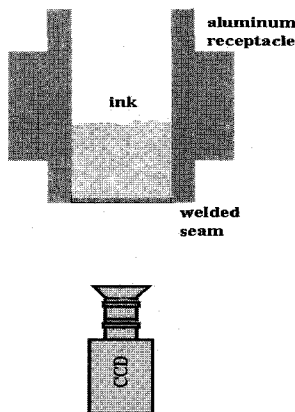


Fig. 9 Infiltration test of Al receptacle

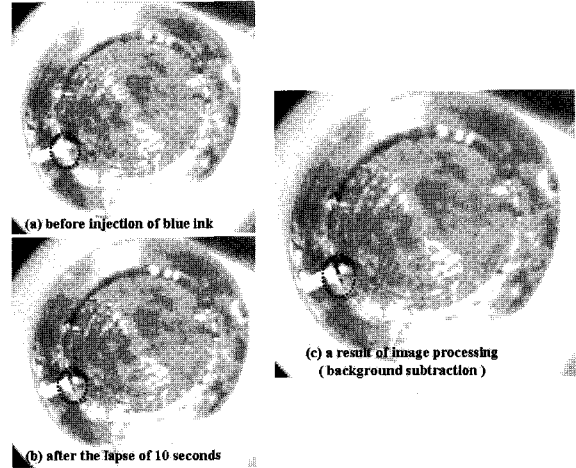


Fig. 10 Inspection images of LPI test for Al receptacle

이다. Fig. 10(c) 는 Fig 10(a)와 (b) 영상을 처리하여 결합 위치에서의 푸른 색 염료가 투과 되는 모습을 보다 선명하게 나타낸 것이다. 액체 침투 검사는 초음파 서모그라피에 비해 측정 시간이 길다는 단점과 더불어 검사 종료 후 시편의 결합 부위에 고착되어 있는 염료의 미립자를 완전하게 제거할 수 없다는 한계가 있기 때문에 엄밀한 의미에서는 비파괴 검사 기법으로 간주되지 않는다. 이에 비해 초음파 서모그라피에 의한 비파괴 검사는 구조물의 외형에 영향을 받지 않으며 관측 카메라로 사용하는 적외선 열 영상카메라의 성능에 따라 초고속 결합 검사가 가능하다는 장점이 있다. 1mK의 온도 분해능과 수 kHz의 초고속 영상 획득 특성을 갖는 적외선 열 영상 카메라의 상용화가 가시화되고 있으며, 이를 활용할 경우 초고속의 결합 검출이 가능할 것으로 기대 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 초음파 펄스 서모그라피를 이용한 알루미늄 용기의 용접 결합 검출에 대해 기술하였다. 2kW의 고에너지를 갖는 20kHz 진동 주파수대의 초음파 펄스(펄스폭 : 280ms)를 알루미늄 용기 외면에 입사시켰다. 초음파 펄스 입사 전, 후 및 인가 기간 동안에 알루미늄 용기 표면의 원형으로 형성된 용접 심의 발열 특성을 적외선 열 영상 카메라로 관측 처리하였다. 초음파 펄스 인가 후 3~5번째 영상 프레임(100~150ms) 시간에 결합 부위에서 가장 밝은 핫 스폿이 관측되었다. 초음파 펄스 인가 전 후의 관측 영상을 처리하여 결합 위치를 추출하였다. 액체 침투 검사법을 이용하여 초음파 펄스 서모그라피에 의해 검출된 결합 위치에서 염료의 누설을 확인하였다.

후 기

본 연구는 원자력 연구개발사업의 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

1. R.B. Mignogna, R.E. Green Jr, J.C. Duke Jr, E.G. Henneke II and K.L. Reifsnider : Thermographic Investigation of High-power Ultrasonic Heating in Materials, *Ultrasonics*, **19** (1981), 159-163
2. L.D. Favro, R.L. Thomas, X. Han, Z. Ouyang, G. Newaz and D. Gentile : Sonic Infrared Imaging of Fatigue Cracks, *Int. Journal of Fatigue*, **23** (2001), 5471-5476
3. L.D. Favro, X. Han, Z. Ouyang, G. Sun, H. Sui and R.L. Thomas : Infrared Imaging of Defects Heated by a Sonic Pulse, *Rev. Sci. Instrum.*, **71** (2000), 2418-2421
4. X. Han, L.D. Favro and R.L. Thomas : Recent Developments in Sonic IR Imaging, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, **22** (2003), 500-504
5. G. Busse, A. Dillenz and T. Zweschper : Defect Selective Imaging of Aerospace Structures with Elastic-Wave-Activated Thermography, *Proc. SPIE* **4360** (2001), 580-586
6. T. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz and G. Busse : Ultrasound Burst Phase Thermography(UBP) for Applications in the Automotive Industry, *AIP Conference Proceedings*, **657** (2003), 531-536
7. K. Zheng, S. J. Cai and S.Y. Zhang : A Robust Method for Information Recognition of Ultrasonic Infrared Thermography, *J. Phys. IV France*, **125** (2005), 535-537
8. L. D. Landau and E. M. Lifshitz : *Theory of Elasticity* (3rd Edition), BUTTERWORTH HEINERMANN BOOK Co, 1997, 137-142
9. I. Perez and W.R. Davis : Optimizing the Thermosonics Signal, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, **22** (2003), 505-512



- 조재완 (曹在完)
- 1960년생
- 한국원자력연구소 원자력 로봇 LAB
- 적외선 신호처리 기술 개발
- e-mail : jwcho@kaeri.re.kr



- 정진만 (鄭鎭滿)
- 1954년생
- 한국원자력연구소 양자광학기술개발부
- 용접공정 및 레이저용접 개발
- e-mail : cmchung@kaeri.re.kr



- 최영수 (崔英洙)
- 1966년생
- 한국원자력연구소 원자력 로봇 LAB
- 수중 로봇 시스템 개발
- e-mail : yschoil@kaeri.re.kr



- 정승호 (鄭丞鎬)
- 1958년생
- 한국원자력연구소 원자력 로봇 LAB
- 로봇 시스템 캘리브레이션
- e-mail : shjung2@kaeri.re.kr



- 정현규 (鄭炫圭)
- 1955년생
- 한국원자력연구소 원자력 로봇 LAB
- 초음파 탐상 시스템 개발
- e-mail : hkjung@kaeri.re.kr