

원자력발전소의 원자로 유지·보수 기술 개발 동향

이병훈, 조종길, 박지홍, 손영호, 홍재근 | 한국기계연구원

1. 서론

1942년 인류가 최초로 원자핵분열 실험을 성공한 뒤, 원자력에너지를 처음 이용한 곳은 1954년 노틸러스 원자력 잠수함으로, 기존 잠수함의 디젤 엔진을 원자력 추진 엔진으로 대체한 것이었다. 그 후 평화적 이용에 관한 연구가 추진되어 발전용으로 사용함으로써 1954년 소련의 오브닌스크 원전, 1956년 영국의 Calder Hall 원전, 1957년 미국의 Shipping port 원전 가동 등으로 이어진다. 우리나라에서는 1962년 트리가마크 II 연구용원자로가 가동된 이후, 상업용으로는 1978년 고리 원전이 최초로 운영되기 시작하였다. 이렇게 원자력 관련 시설은 전세계적으로 최초 설치 후 40~50년이 경과함으로써, 최근에는 설계수명이 다 된 관련 시설을 폐기하거나, 수명연장을 통해 보다 더 긴 시간을 서비스할 수 있도록 개보수가 진행되고 있다. 따라서 원자력발전 플랜트 경년화 현상이 진행됨에 따라, 원전 플랜트의 정상 출력 가동을 위한 유지·보수에 관련한 연구개발 활동은 최근 각광을 받고 있는 분야로 자리 잡아가고 있다.

우리나라의 경우에는 2007년이 되면 고리 원전을 필두로 하여 원래의 설계수명이 다 되어 폐로 되어야 할 운명이다. 그러나 선진 각국에서는 원자로의 '수명연장계획'과 같이 시간 경과에 따른 노후화된 기기 부품의 교체 등을 통하여 발전소의 서비스 기간 연장을 꾀함으로써 원자력발전소용 부지선정의 어려움을 극복하고 있으며, 또한 방사능물질이 전달되지 않는 고가의 2차측 설비 등에 대해서는 그대로 활용함으로써 자원절약과 원가절감이라는 여러 장점들을 활용하고자 하고 있다. 또한 고리 원자력 발전소 이외에도 그 이후 우리나라에 설치한 원자력발전 플랜트는 총 20 개에 달하고 있어 발전 플랜트의 유지 보수와 관련된 기술개발 수요는 앞으로 더욱 점증하게 될 것으로 기대되고 있다.

원자로 보수시의 특징은 일반 화학플랜트 등의 보수와 달리 방사능 피폭의 문제와 중성자 조사에 의한 재료의 변이로 인한 보수의 어려움이 있다. 우선 방사능 피폭의 경우 방사능 물질이 도달하지 않으면서 고압증기만 전달되는 발전터빈 등이 설치되어 있는 2차측에 대해서는 일반 플랜트 설비와 전혀 차이가 없어 보수에 큰 어려움이 없다. 그렇지만 방사능 물질이 누적되는 1차측의 원자로, 밸브, 펌프, 배관의 경우에 있어서는 보수 시 방사능 피폭이라는 특수한 환경을 만나게 되어 보수의 어려움이 커지게 된다. 따라서 방사능 피폭을 줄이기 위해 원자로, 내부 설치물, 기기, 배관의 보수 교체를 물속에서 수행하게 되는 경우가 발생하는데, 이것은 물이 방사능 피폭을 차단하는 훌륭한 차폐체로서 대기 중에 비해 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 수준으로 줄여주기 때문이다. 따라서 관련 시설의 유지·보수 시

수중에서 작업을 수행하는 경우 방사능 피폭의 위험을 크게 줄일 수 있는 장점이 되고 있다. 다음으로 중성자조사에 의한 재료의 변이는 헬륨 기공의 발생을 초래하여 보수 시 균열 발생의 원인으로 되고 있어, 고준위 중성자조사 부위에 대한 체계적인 유지·보수 관련 기술 개발이 요구되고 있다. 다음 그림 1은 중성자조사의 정도를 보여주는 원자로의 개략도이다. 중성자 조사를 고준위로 받게 되는 원자로 하단부 부위에는 중성자조사에 의한 강도 저하현상을 확인하기 위해 감시(surveillance) 시험편을 걸어놓고 일정시간 경과 시마다 꺼내어 충격시험을 하고 있다. 중성자조사를 많이 받게 되는 부위에서는 원자이동에 의한 인성치 저하현상이 발생하며, 보수용접 시에는 다른 부위 용접에 비해서 헬륨 기공에 의한 균열 발생이 쉬워지는 현상이 발생한다. 다음에는 원자로의 저준위중성자조사 및 고준위중성자조사 구역 각각에 대한 유지·보수 기술개발 활동에 대해 기술한다.

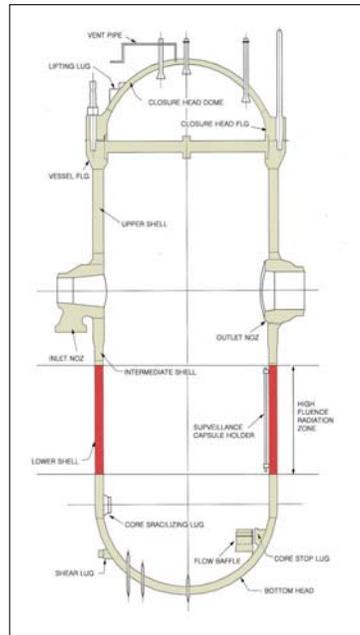


그림 1. 원자로의 고준위 중성자 조사 구역

2. 저준위 중성자 조사구역(low-fluence zone : LFZ)에서의 수중보수용접

수중용접의 역사는 1917년 선박 외피의 봉합선이나 리벳부위에서의 누수를 막기 위해 최초 적용된 것으로 기록^[1,2]되고 있으나, 수중용접의 본격적인 적용은 그 보다 훨씬 뒤인 1990년대에 들어서 활발히 적용되기 시작하였다. 이것은 석유 채굴을 위한 플랫폼 설비, 해저 수송배관 항만설비의 운용을 위해 바다에서 용접하는 경우가 급증하였기 때문이다. 따라서 1985^[1,2]년경에는 수심 100m에서 작업하는 수중용접사 및 수중용접절차서 인증방법까지도 개발되게 되었다.

수중에서의 용접은 대기 중의 용접과는 달리 용접부의 급냉이 발생하고, 수중에서의 용접인 까닭에 용접부에서 균열 발생이 원인이 되는 수소원이 풍부하며 수중에서의 과압 분위기로 인한 용접부의 탄소, 산소량의 증가현상과 망간, 실리콘의 손실 등으로 인한 용접부 결함 발생이 매우 쉽게 일어난다^[1,2]. 이러한 현상은 특히 철강 재료의 경

우 더욱 심하게 일어날 가능성이 있어 이에 대한 대비책이 요구된다. 그러나 원자로에서 사용되는 재료는 주로 304 또는 316의 오스테나이트 스테인레스 재료로서 수소 고용도가 높아 용존 수소로 인한 저온균열 현상을 충분히 예방할 수 있다는 장점이 있다. 실제 308L SMAW 용접봉을 사용하여 304 모재에 대한 고품질 용접부를 얻고 있음이 보고되었고, 1980년 이래로 40 건 이상의 수중용접이 원전 플랜트에 적용된 실적^[1,2]을 갖고 있다.

수중용접의 필요성이 점증함에 따라 공정의 개선도 많이 발전하였는데, 피복아크용접봉을 수중에서 그대로 사용하는 습식용접에서 더 발전하여, 수중에서도 용접부만을 국부적으로 건식상태로 만들어 용접함으로써 용접부의 품질을 향상시킨 국부건식용접법이 개발되어 많이 적용되고 있다^[3,4]. 이 공정은 용접부 주위에 국부적으로 공동을 형성함으로써 물을 차단 시켜 용접을 수행하는 방법으로 국부공동이 만들어지는 순간에 있어서는 대기중 용접과 동일한 상태의 용접을 가능하게 하는 방식이다. 이러한 국부건식용접법을 이용하여 원자로를 보수하려는 연구와 관련 업체의 노력이 활발히 진행^[3,4]되고 있다. 특히 이 용접법은 원자로내의 여러 시설물의 탈락이나 낙하로 인해 발생하게 되는 원자로 바다 판의 손상이나 결함보수에 대비하기 위해 적용되는 방법이다. 그림 2 및 3은 원자로 바다의 보수에 적용하기 위한 국부건식용접의 모식도와 국부건식용접토치의 실물 사진이다. 이 토치는 국부공동 형성 원리는 토치 원주방향으로 고압의 물을 펌프로 쏘아 토치가 놓여 있는 수심에서의 압력을 견디어내면서 용접 시 사용되는 차폐가스를 고압으로 흘림으로써 고압수 내의 공간을 빈 공간 상태로 만들어 용접하는 방식이다. 따라서 용접하는 순간에는 공기 중에서도 똑같은 상태로 용접이 수행되어 고품질의 용접부를 확보하게 하는

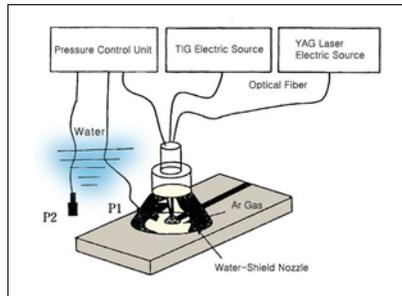


그림 2. 수중 국부건식용접의 모식도

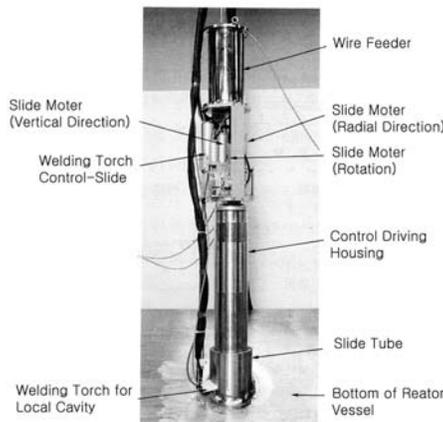


그림 3. 국부공동수중용접용 토치

방법^[5]이다.

다음 표 1은 미국 원자력발전소에서의 중성자조사가 비교적 낮은 원자로 부위에 대한 보수에 관해 학회지 등을 통해 발표된 자료를 수집한 자료^[6,7]이며, 미국에서의 원자로 보수는 주로 방수 코팅이 된 수동피복아크용접봉을 사용하여 보수에 사용하고 있다.

표 1. 미국 원전의 수중용접보수 현황

Date	Plant	Repair	Mat'l	Weld Depth	Weld Process	Electrode
1987	Susquehanna Unit 1	Steam Dryer Hood	304 SS	1.8~4.3m	SMAW	316L waterproof coating
1988	Susquehanna Unit 1	Feedwater Sparger	Aust SS	13m	SMAW	316L waterproof coating
1989	Susquehanna Unit 1	Steam Dryer Drain Channel	304 SS	5m	SMAW	316L waterproof coating
1989	Susquehanna Unit 1	Steam Dryer Tie-Rod Capture Plates	304 SS	1.8~4.3m	SMAW	316L waterproof coating
1988	Peach Bottom Unit 3	Steam Dryer Drain Channels Alignment/Seismic Lug	304 SS	4~6m	SMAW	316L waterproof coating
1989	River Bend Station	Feedwater Sparger Pipe	316L	13m	SMAW	316L waterproof coating

그러나 이러한 SMAW 용접법은 용접부에 기공(porosity)이나 용융부족(lack of fusion) 등의 용접결함^[8]을 발생하기 쉬운 문제점을 안고 있다. 그래서 미국 발전사업자협회의 연구기관인 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 이에 대한 해결책으로 펄스아크를 이용한 개선된 SMAW 용접법을 적용하여 스패터감소와 용입 향상 용접법에 대한 연구를 진행하고 있으며, 또한 원자로 하부에 대한 보수에 대해서는 원격자동 보수용접의 적용에 관한 연구^[9]도 진행하고 있다.

3. 고준위 중성자 조사구역(high-fluence zone : HFZ)의 보수용접시 문제점

산업용 원자로에서 중성자가 고준위로 조사된 구역(high-fluence zone : HFZ)에 대한 보수용접의 적용 사례는 지금까지 발표된 사례가 거의 없는 편이다. 그러나 폐기되거나 실험용 원자로의 고준위 중성자조사부위에 대한 보수용접 사례는 간혹 발견되고 있다. 방사능 재료만을 생산하기 위해 미국 Savannah River Site에 설치되었던 생산용 원자로에서 시간당 105 렘(rem)이 조사되는 중성자고준위조사 구역에 대한 보수가 그 예인데, 고탄소(~0.07% C) 304 스테인레스 재료로 만들어져 제작 중 용접부위의 예민화가 발생되었으며, 사용 중 응력부식균열이 진행되었던 탱크 중심부-하단부 연결부위인 knuckle 부위(그림 4 참조)에 대해 GTAW로 패치 용접을 수행^[10,11]한 것이 있다.

그러나 2차 보수용접 시(1986), 1차(1968) 보수 부위의 patch된 재료에서는 균열 발생이 없었으나 탱크 재료에서는 심각한 균열이 발생한 것을 발견하고 이에 대한 원인 규명을 실시한 결과, 균열 발생의 여러 원인 중 헬륨

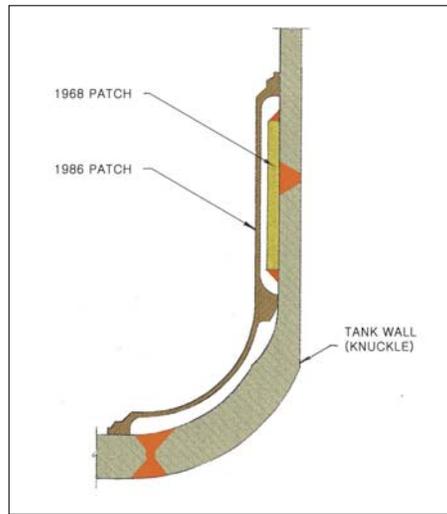
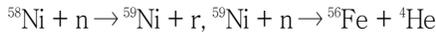
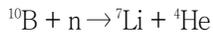


그림 4. Savannah River Site 원자로의 보수용접 부위

유기균열이 원인^[12, 13]이었음을 알게 되었다. 재료 내의 헬륨 발생은 중성자 조사와 밀접히 관련되는데 스테인레스 재료 중 B, Ni이 중성자 조사를 받게 되면 다음 식과 같이 헬륨^[14]을 생성하게 되며, 이렇게 발생된 헬륨에 의해 보수 용접 시 헬륨의 크기가 나노메타 크기로부터 용접 후 1 마이크로 정도 성장하거나 200℃ 이하의 저온에서는 10⁻¹ 나노메타 크기에서 200 ~ 600 ℃의 고온에서는 2 ~ 10 나노메타로 성장한다고 보고하고 있다.



헬륨 기공은 중성자조사결함 부위, 석출물 경계부, 전위 및 특히 결정입계 등에서 핵생성이 용이하며, 높은 온도와 인장응력 하에서 성장이 용이하게 된다. 따라서 기존의 완전용입의 고입열 용접에서는 열영향부에서의 높은 인장력과 헬륨 기공형성에 용이한 고온 형성 조건이 형성됨으로써 균열 발생이 쉬운 환경이 조성되어 HFZ에 대한 보수는 실용화되고 있지 못한 실정이다. 그럼에도 불구하고 헬륨유기균열과 밀접히 관련되는 HFZ에 대한 보수 기술 개발을 위한 체계적인 연구가 진행되고 있는데 미국 에너지성에 추진하고 있는 “fusion reactor research program” 연구가 대표적이다. 이 연구과제는 재료 내의 헬륨 기공을 모사하기 위하여 수소 동위체인 tritium 원소를 doping 처리함^[15]으로써 중성자조사 재료와 유사한 환경을 만든 재료에 대해 보수용접을 적용하는 방식의 연구 내용이다. 또한 헬륨 기공 형성 가능성을 낮추기 위해 낮은 입열량을 사용하면서 deep penetration의 용접을 지양하고, 원자로의 표면균열의 개구부와 물과의 접촉을 방지하기 위한 수중 laser 용접 기술개발^[16] 등을 시도하고 있다. 그림 5는 일본에서의 기술개발 활동을 보여주는 사진으로 고준위 중성자가 조사된 원자로 표면의 형태를 모사한 0.3 mm 크기의 모의 결함에 대한 보수용접을 보여주는 사진이다.

또한 HFZ의 보수용접의 열영향부위에 대한 인장응력을 개선하기 위해 레이저를 이용하여 피닝효과를 얻기 위한 연구^[16] 등도 진행되고 있어 HFZ에 대한 보수용접이 가능성을 열어가고 있다.

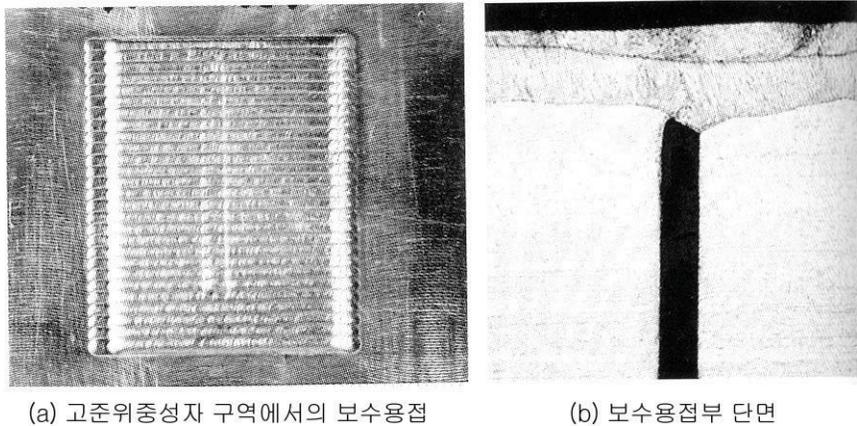


그림 5. 고준위 중성자 조사구역에서의 표면인공균열을 가정한 부위에 대한 수중 레이저용접 단면도

4. 수중용접 관련 기술기준 개발동향

미국기계학회(American Society of Mechanical Engineer : ASME)에서 수중용접에 관한 관련 코드를 발간하기 전부터도 미국용접협회(American Welding Society : AWS) 규격인 AWS D 3.6 “Specification for Underwater Welding”을 이용하여, 노후되거나 손상사고가 발생한 원자로, 기기, 배관 등에 대한 수중보수용접에 의한 보수를 해오고 있었다. 물론 이렇게 ASME 규격 이외의 타 규격을 이용하기 위해서는 ASME 코드를 이용해서 제작되지 않은 기기에 대해서만 적용 가능하므로 steam dryer나 feedwater sparger pipe 등 일부 기기에 한정하여 적용되어 왔다. AWS D 3.6의 개발은 원래 바다 속의 석유를 개발하기 위해 설치한 해저 파이프라인, 석유탐사선 등에 대해 제작이나 보수 시에 적용하기 위한 기술기준으로 1983년에 처음 개발되어 사용되었다. 따라서 이 규격은 주로 해양구조물에서 사용하였던 탄소강이나 저합금강을 대상으로 용접변수, 용접사 및 용접절차서 승인에 관한 사항을 규정하고 있다.

이에 반해 원자로에서는 주로 스테인레스 304, 316 등을 주 소재로 하고 있으며 방사능 피폭이라는 특수 환경을 고려해야 하는 특성이 있다. 이에 따라 1989년 EPRI에서 독자 규격 개발에 착수하여 1993년 원자로에 적용 가능한 Code Case N-516을 발표하고 1995년에 이를 코드로 채택하였다. 이 규격의 특징은 AWS D 3.6의 기존의 내용에 ‘용접봉 승인사항’과 용접절차서에 따른 ‘확인용접’ 사항을 추가하고 있다. 용접봉 승인사항에서는 각 용접봉의 heat 관리, lot 관리, 용접봉의 방수피복상태, 해당 수심에서의 용접봉 성능 등에 대한 승인 기준을 기술하고 있다. 또한 확인용접에서는 용접변수의 범위를 규정하고 있는 용접절차서와는 달리 mockup 용접을 의무화하고 있다. 이것은 방사능 피폭 등의 특수 환경을 고려한 용접 숙련도의 달성을 위한 것으로 사료된다.

5. 결 론

지구 온난화, 석유자원 부족 등의 이유로 앞으로도 원자력발전소의 이용은 불가피한 추세이며, 또한 원자력발전

소의 설치와 운용기간이 오래 됨에 따라 원전기기의 유지보수기술개발은 최근에 들어 국제적으로도 활발한 연구가 진행되고 있는 분야이다. 이러한 추세에 발맞추어 우리나라에도 최근 산업자원부 주관으로 “원전기술 발전방안(Nu-Tech 2015)”을 수립함으로써 ‘원자력발전에 관한 선진 기술 개발’ 및 ‘원자력발전 설비의 성능향상 기술 개발’에 대한 연구를 지원하겠다는 방침을 정하고 원전 설비 제작의 신기술 개발을 포함한 원전 설비의 노후화에 대비한 기술개발 방침을 정하였다. 원전 설비의 노후화에 대비한 개보수의 핵심기술은 방사능을 차폐하면서도 대기 중에서도 같은 높은 수준의 성능을 확보하는 것이므로, 이에 따른 수중용접의 기술 개발과 수중용접부의 품질 향상 기술 개발에 대한 연구가 시급히 요청되는 시점이라고 할 수 있다.

❁ 참고 문헌

- [1] Grubbs, C.E. “Whitey”, “Underwater Wet Welding(A State-of the Art Report)”, Proceedings of Underwater Intervention 1994, 1994 February 7-10, 1994, San Diego, CA, Underwater Intervention '94 Conference Committee, Washington, D.C., pp. 93-103, 1994
- [2] Grubbs, C.E. “Whitey”, “Underwater Wet Welding(A State-of the Art Report)”, Proceedings of 12th International Confererence on offshore Mechanics and Artic Engineering, Glasgow, Scotland, June 20-24, 1993, American Society of Mechanical Engineer, New York, NY, PP. 111-118, 1993
- [3] 小林 正宏, “原子力分野と溶接”, 溶接技術, pp. 99-105, No.3 2000
- [4] 立石 瑞生, 中川 二與, 林 勝久, “經年プラントニ對する豫防保への取組み”, 東芝レビュー pp. 821-824, No.11 1993
- [5] 榑原 實雄, “水中溶接に關する基礎的研究, 1984
- [6] O’ Sullivan, J. E., “Wet Underwater Weld Repair of Susquehanna Unit 1 Steam Dryer”, Welding Journal, pp. 19-23, June 1988
- [7] Mahan, G.D., “Wet Underwater Weld Repair of Feedwater Sparger Pipe”, Welding Journal, pp.26-30, January 1990
- [8] Smith, R. E., W. J. Childs, “Development Program for In-Vessel Reactor Repair of Stress Corrosion Cracked Components”, SMiRT 11 Post Conference Seminar No. 2: Assuring Structural Integrity of Steel Reactor Pressure Boundary Components, Taipei, Taiwanm August 26-28, 1991, Atomic Energy Society of Japan, Tokyo, Japan, 1991
- [9] Findlan, S.J., M.K. Phillips, A.G. Peterson, Jr., Underwater Wet Welding for the Repair of Reactor Pressure Vessel Internals: Interim Report, NP-7481, Eletric Power Research Institute, Palo Alto, CA, January 23, 1992
- [10] Maloney, J.P et al., “Repair of a Nuclear Reactor Vessel”, DP-1199, F.I. du Pont de Nemours & Co., Inc., Savannah River Laboratory, Alken, SC, June 1969
- [11] Kanne, W.R., Jr., “Remote Reactor Repair: GTA Weld Cracking Caused by Entrapped Helium”, Welding Journal, pp. 33-39, August 1988

- [12] Hall, M.M., Jr., et al., "Fusion Welding of Irradiated AISI 304L Stainless Steel Tubing Weldment": Physical Metallurgy and Failure Phenomena, Proceedings of the 5th Bolton Landing Conference, pp. 365-378, 1978
- [13] Atkin, S.D., Hanford Eng. Dev. Lab., Richland, Wash., Alloy Development for Irradiation Performance Semiannual Progress Report for Period Ending Sep. 30, 1981, Doe/ER-0045/7 U.S. Department of Energy, Office of Fusion Energy, pp. 110-117, Mar. 1982
- [14] Goods, S.H., C.W. Karfs, "Helium-Induced Weld Cracking in Low Heat Input GMA Weld Overlays". Welding Journal, Welding Research Supplement, pp. 123s-132s, May 1991
- [15] Kanne, W.R., G.T. Chandler, D.Z. Nelson, E.A. Franco-Ferreira, "Welding Irradiated Stainless Steel", Journal of Nuclear Materials, Vol. 225, pp. 69-75, 1995
- [16] 前川 治, 服部 靖弘, 須藤 亮, "先端技術による原子炉保全の展開" 東芝レビュー, pp. 15-18, No.4 2002



이 병 훈

· 한국기계연구원 공인시험평가부 선임연구원
· 관심분야 : 알루미늄 접합, 용접공정
· E-mail : bhlee@kmail.kimm.re.kr



조 종 길

· 한국기계연구원 공인시험평가부 책임연구원
· 관심분야 : 용접, 비파괴검사
· E-mail : ck1212@kmail.kimm.re.kr



박 지 홍

· 한국기계연구원 공인시험평가부 선임연구원
· 관심분야 : 용접, 스포츠 재료
· E-mail : jhpark@kmail.kimm.re.kr



손 영 호

· 한국기계연구원 공인시험평가부 선임연구원
· 관심분야 : 초음파, 용접/비파괴검사
· E-mail : yhson@kmail.kimm.re.kr



홍 재 근

· 한국기계연구원 공인시험평가부 선임연구원
· 관심분야 : 고에너지 빔 용접, 재료파괴인성
· E-mail : jkhong@kmail.kimm.re.kr