

원전 연료집합체의 손상, 변형 및 이물질 검사시스템 개발에 관한 연구

박기태¹, 노태정^{2*}

¹한전KPS(주), ²동명대학교 메카트로닉스공학과

A study on development of screen inspection system to detect damages, bowing, and foreign materials of nuclear fuel assembly for reactor in nuclear power plants

Ki-Tae Park¹ and Tae-Jung Lho^{2*}

¹Tech. R&D Institute, KEPCO KPS

²Dept. of Mechatronics Eng., Tongmyong University

요 약 원전 연료집합체의 연료봉 내에 잔존하여 연료봉의 손상을 발생시킬 수 있는 이물질의 잔존 여부 및 연료봉의 손상, 연료봉의 휨, 뒤틀림, 그리드 손상여부를 비전기술과 레이저 스캔 기술을 응용한 원전 연료집합체 스크린 검사 방법을 개발하여 계획예방 정비 기간 중 검사가 가능하도록 연료집합체 검사의 신뢰성과 생산성을 확보하였다. 또한 검사 데이터를 집계, 분석하여, 연료집합체의 변형 상태를 지속적으로 감시함으로써, 국내 각 원자로별 노심 내 연료변형 패턴을 이해할 수 있다. 이는 연료 재장전 도중 발생 가능한 그리드 손상을 방지하는데 기술정보로 활용되어 국내의 원전 안전 운영의 중요한 데이터베이스를 제공하게 된다.

Abstract Screen inspection system applied vision and laser scan technology which detect foreign materials caused fuel rod to be damaged, and which inspect fuel rod damage, bowing, distortion and grid damages, was developed to secure reliability and reproductivity of inspection method for nuclear fuel assembly during outage. In further, datum of inspection results will be continuously monitored and given understand the pattern of bowing and distorting for fuel assembly in reactor. Understanding of the pattern will be key technical information to avoid grid damage might be happened during refueling outage and provides important data base for safe operation of nuclear power plant in Korea and world wide.

Key Words : Nuclear Fuel Assembly, Grid Damage, Bowing, Foreign Materials, Laser Scan Inspection, Masking Filter

1. 서론

EPRI(Electric Power Research Institute)의 2000년~2009년 조사 자료에 따르면, 전 세계 원자력발전소 약 400기(2008년 기준) 중 30%-40%의 발전소에서 이물질에 따른 핵연료의 손상 사례는 매년 발생되고 있고 있다. 국내 원전에서도 이물질 유입방지 대책 수립에 많은 노력

을 기울이고 있다. 원자로 냉각재 계통에서 이물질에 가장 취약한 기기는 연료집합체(fuel assembly)로서 다양한 종류의 이물질로 인하여 연료봉 손상이 발생하고 있다 [1-3].

현재의 핵연료집합체 검사방법은 4대의 수중카메라를 이용하여 최외곽열 연료봉의 4면을 2~4명의 검사자가 육안 검사하는 방법으로 전체 검사기간 동안 실시간으로

본 논문은 지식경제부의 2009년도 원전기술혁신사업 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Tae-Jung Lho(Tongmyong Univ.)

Tel: +82-51-629-1533 email: tjlho@tu.ac.kr

Received July 10, 2013 Revised (1st July 18, 2013, 2nd July 22, 2013, 3rd July 25, 2013) Accepted August 7, 2013

수행하여야 한다. 따라서 육안검사자의 숙련에 따라 좌우되기 때문에 검사 신뢰성이 향상에 어려움이 있으며, 검사에 많은 인력이 투입되어야 함과 동시에 고도의 집중도가 요구된다. 또한 육안검사 장비로서 검사할 수 있는 제한성으로 인하여, 연료봉 변형, 휨, 손상 등의 상태의 측정이 곤란하여 데이터 확보가 어려워 지속적인 추적관리에 한계가 있다.

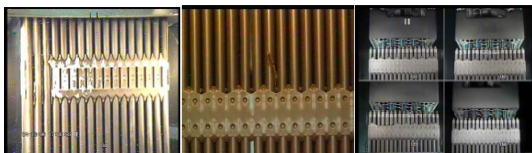
그 이외에 개발된 검사방법은 와전류탐상시험(eddy current test)[4,5], 초음파탐상시험(ultrasonic test)[6] 등이 있으나, 이 두 가지 방법 모두 육안검사 결과로 연료 선별이 우선되어야 하고, 방사선 차폐가 된 테스트벤치 준비가 필요하며, 때로는 연료 집합체 분해가 필요로 하는 등으로 검사를 위한 사전 조건의 제한성과 추가 공기가 필요한 특정 연료 개별검사 방법으로 전수 검사가 곤란하다.

따라서 원전 연료집합체 검사방법이 지속적 개발되고 있으나, 검사 조건의 제한성과 추가 공기 필요 등, 에 의하여 현장 적용에 어려움을 겪고 있으며, 계획예방정비기간 중에 수행할 수 있는 전수 검사는 수중 카메라에 의한 육안검사에 의존하고 있으며, 일회성 육안검사로 인하여 연료의 변형 추이 등을 감시할 수 있는 데이터베이스(data base) 확보가 곤란하다.

이에 대하여 본 연구에서는 계획예방정비 기간 중 연료 인출하여 사용 후 핵연료 저장조의 어펜더(append)에서 검사하는 실시간 검사 방법으로서 비전과 레이저스캔 기술을 응용한 핵연료 집합체 전수검사시스템을 개발하였다[7-10].

2. 원전 연료 검사시스템 개발

Fig. 1은 일반적으로 발생하는 연료 집합체의 그리드(grid) 손상, 이물질, 처짐 등을 보여주고 있다.



[Fig. 1] Damages of fuel assembly

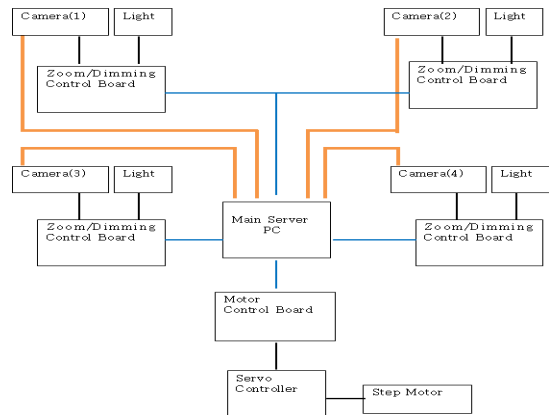
연료집합체 검사시스템은 모의 연료집합체, 카메라 및 레이저스캔 장치, 영상 및 데이터 처리장치, 제어장치, 워크스테이션 및 응용 소프트웨어 등으로 구성되어 있다. Fig. 2와 같이 연료 집합체의 검사 절차는 우선 연료봉의

고유번호를 인식한 후 그 연료봉들의 영상을 취득, 분석하고, 또한 3D scan 데이터와 비교하여 최종적으로 연료의 건전성을 평가한다.



[Fig. 2] Inspection procedure of fuel assembly

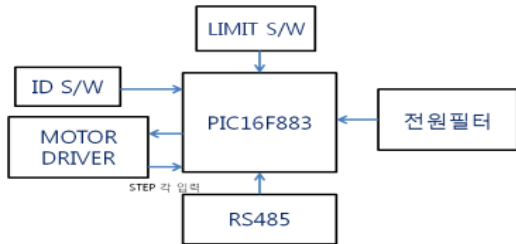
Fig. 3과 같이 3D scan vision system은 원전 연료봉의 이상 유무를 판별하는 수중 카메라와 제어장치, 영상처리장치 및 응용 소프트웨어로 구성되어 개발하였다. 건전한 연료봉의 영상 데이터를 기준으로 검사대상 연료봉의 영상 데이터를 처리하며 이상 유무를 판단하며, 판단 기준은 연료봉의 휨, 터짐, 처짐 등과 그리드의 깨짐, 연료봉에 붙어 있는 이물질의 위치를 판별한다. 또한 처리된 결과 데이터를 기준으로 4면의 2D 도면 및 엑셀 데이터를 생성하고, 최종적으로 3D의 도면 형태로 렌더링 결과를 도시하고, 각 4면의 개별 동영상 및 처리결과와 데이터를 PC에 별도로 저장하여 데이터베이스화 한다.



[Fig. 3] Configuration of 3D scan vision system

여기서 생성된 아날로그 영상신호는 frame grabber를 거쳐 샘플링 속도로 디지털 신호로 저장되어 워크스테이션에서 처리할 수 있는 신호로 변환되어 데이터의 저장, 분석이 가능하게 만든다.

카메라의 구동은 스테핑 모터와 5상 AC 스테핑 드라이버 MD5-HF14를 사용하고, 제어 보드와는 포토커플러 등을 사용하여 절연시키고, 필터 사용으로 전원부의 노이즈를 방지하였다. RS485로 수신된 신호로 제어, TVS 다이오드 등을 설치하여 ESD를 방지하였다. Fig. 4와 같이 마이크로컨트롤러는 노이즈에 강한 PIC16F883를 사용하고, 또한 엔코더를 사용하여 모터 스텝각 거리를 환산하고, 리미트 스위치를 이용하여 상하좌우 최종점 확인하고, DIP 스위치로 각 모터 ID 부여하였다.



[Fig. 4] Configuration of Camera Actuation System

[Table 1] Specification of line Laser LM-6305MS

items	specifications
Optical Power(mW)	2.5(Tc=25℃)
LD Power(mW)	5(Max)
Output Efficiency(%)	50
Wavelength(nm)	637 ±8
Focus Beam Width(mm)	<0.1 (at 300mm)
Collimated Beam W(mm)	<3 (at 10m)
Fan Angle(°)	15,30,45,60,90,120
Line Pattern	Accurate Straight
Beam Quality	TEM00
Beam Intensity Pattern	Gaussian
LD Pin Connection	Case Ground

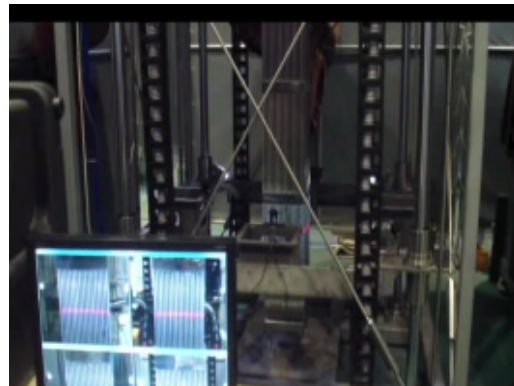
레이저 모듈은 도트(dot) 형태의 평행광 또는 집광된 빔을 cylinder lens를 통해 라인으로 주사하는 라인(line) 레이저를 사용하였다. 여기서 사용자가 원하는 길이는 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120° 에 해당하는 길이로 방사되는 레이저이다. 본 장비에 사용된 레이저 모듈은 라인레이저로서 LM-6305MS 이며, 그 주요사양은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 5와 같이 개발한 연료집합체 검사시스템에서는 고리/울진/월성/영광 원전발전소, 검사대상 연료봉 집합체의 호기, 고유번호들을 입력하여 검사대상 identity를 확보하였다.



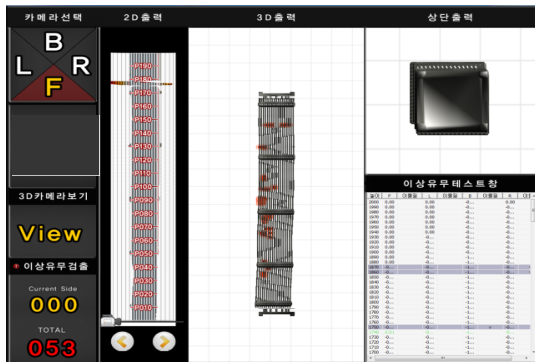
[Fig. 5] Input of ID number

Fig. 6과 같이 연료 육안검사 영상 데이터를 얻기 위해 4대의 카메라가 연료봉의 상단부터 촬영을 하며 검사영상을 vision system으로 전송한다.



[Fig. 6] Operation of 3D scan vision system

데이터 취득은 연료봉 변형, 손상, 이물질 등을 프로그램 시퀀스에 따라 측정 후 2D, 3D 데이터를 생성하는 자동검사와 특정부위 정밀검사를 위하여 사용자의 직접적 명령에 따라 카메라 위치의 상하 이동, 줌 제어, 조명 제어 등의 명령을 수행하는 수동검사로서 개발하였다. 여기서 Fig. 7은 검사결과 출력 화면이다.

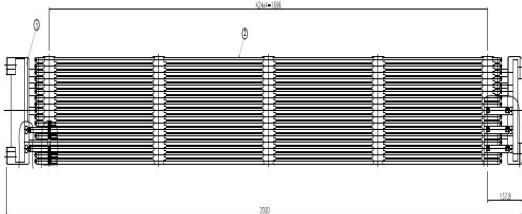


[Fig. 7] Printing display of inspection results

측정된 연료봉의 3D 데이터를 정면으로 출력하고, 측정된 3D 영상을 정면기준으로 표시하며, 검사 중 이상 발생 시 해당 위치에 crack 표시를 하도록 개발하였다. 연료봉의 휘어짐을 판단하기 위해 상단으로 출력하여 측정된 3D 영상을 윗면 기준으로 나타낸다. 측정된 4개 면의 표시 전환은 2D 출력 화면의 화살표 버튼을 클릭할 때마다 출력되는 면이 바뀌면서 2D 데이터(F:전방, L:왼쪽, B:후방, R:오른쪽)를 확인할 수 있도록 개발하였다.

3. 시험 결과 및 검토

실제의 한국형 핵연료 집합체를 검토하여 노심에 장전되어 있는 연료집합체와 동일한 실제 크기의 모의 핵연료 집합체를 Fig. 8과 같이 설계, 제작하였다.

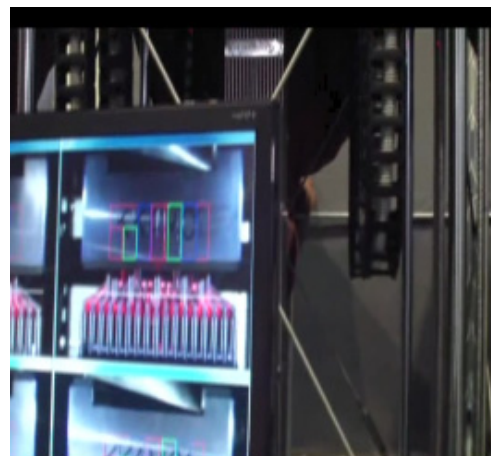
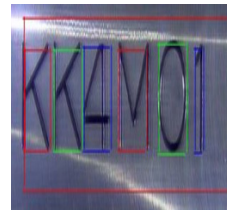


[Fig. 8] Full-scaled fuel assembly pilot

모의 핵연료 집합체에서 연료봉 처짐, 손상, 이물질 유입, 휨, 그리드 찢어짐 등의 비정상상태를 고의로 발생시켜 삽입한 후, 개발한 3D vision scanning 및 Laser scanning 시험을 수행하였다.

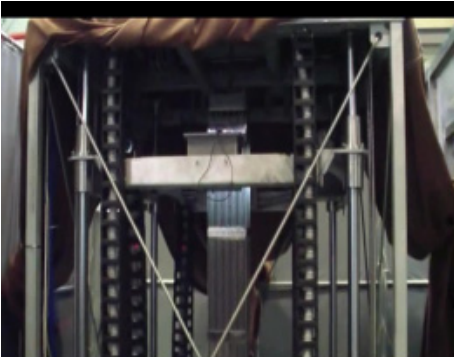
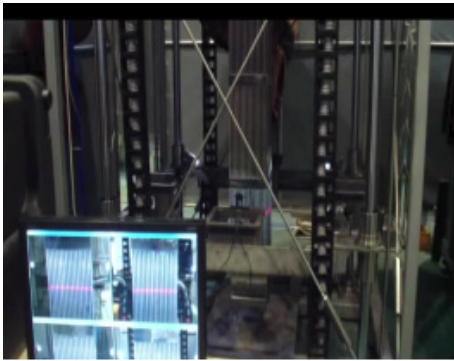
연료봉 ID 인식은 각 연료봉의 첫 측정시 기준점을 설정하여 문자열이 존재하는 영역보다 임의로 큰 영역을 설정한 다음, X축 기준으로 첫번째 문자의 좌측부터 배경보다 어두운 최소 X좌표와 우측으로 존재하는 첫번째 문자의 최대 X좌표를 구하고, 같은 방법으로 Y축 기준으로 최소 Y좌표와 최대 Y좌표점을 구한다.

위에서 구한 좌표점을 통해 문자열의 영역을 알아내고 bitmap 폰트로 저장한다. 나머지 문자도 같은 방법으로 알아내어 저장한다. 저장된 폰트는 기준 값으로서 미리 정의된 폰트와 유사성을 크기 및 좌표의 유사성을 검토하여 문자로 인식한다. Fig. 9는 'KK4M01' 연료집합체 고유번호 인식 시험을 나타내고 있다.



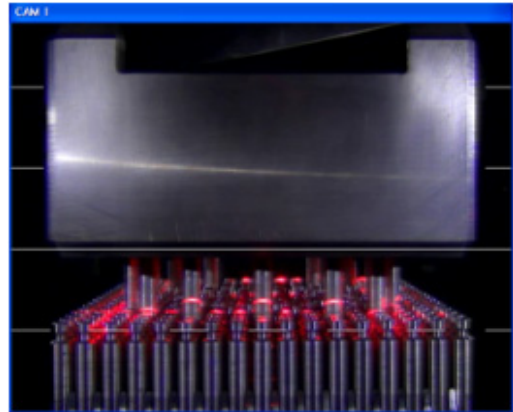
[Fig. 9] Identification test of fuel assembly

Fig. 10과 같이 연료 육안검사 영상을 얻기 위해 3D Video/Laser scanning의 4대의 카메라가 연료봉의 상단부터 하단까지 촬영을 하며 검사영상을 vision system으로 전송한다. Fig. 11과 같이 검사가 완료되면 연료봉 4개의 검사면에 대한 데이터를 출력하고 3D 형태의 연료봉 렌더링 결과를 도시한다.

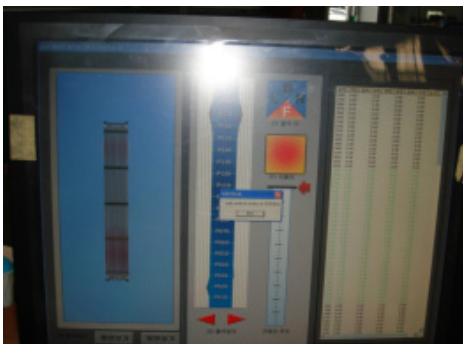


[Fig. 10] 3D Video/Laser scanning work

연료봉 처짐은 각 4면의 카메라함 및 카메라 설치시의 정밀도 차이로 인해 4분할 영상의 높이 편차가 심하게 발생되어 소프트웨어의 표준화가 어렵고, 높낮이 차가 수 mm이면 영상에서는 수십 pixel의 차이로 나타남을 보정하기 위하여, 4대의 카메라 설치 높이 및 위치 편차에 대한 각 영상 시작 위치의 기준점 보정프로그램을 개발하여 Fig. 12와 같이 기구적 편차를 기준점으로 일치시켜 비교, 측정한다.

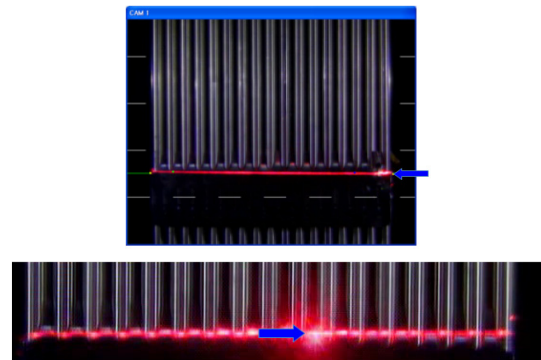


[Fig. 12] Image for deflection of fuel assembly



[Fig. 11] Image capture and rendering work

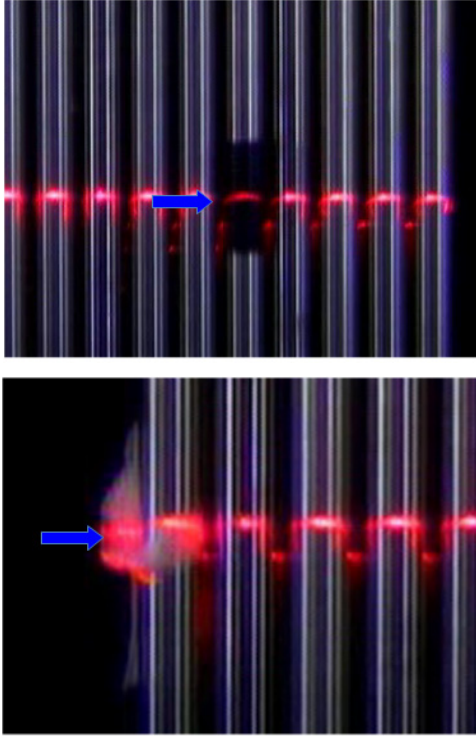
연료봉이 편평한(flat) 형태로 손상된 경우에 심한 난반사가 일어나는데 이로 인한 검출 특성이 저하되므로 안정되고 높은 검출 확률의 확보가 필요하여 3D scan 카메라의 z 데이터를 본 프로그램에 적용하였으며, Fig. 13은 연료봉 그리드 손상 영상의 z 데이터를 보여주고 있으며, 안정되고 높은 검출을 확보하였다.



[Fig. 13] Image for damage of fuel assembly

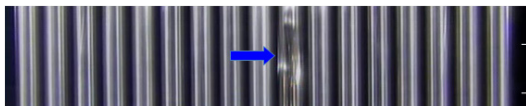
Fig. 14와 같이 연료봉 이물질은 검은색 테이프와 섬유물질로서 시험을 하였고, 연료봉 위 검은색 이물질의

경우 라인 레이저 밝기가 확연히 변화하며 화면은 검은 색 테이프 부분에서 라인 레이저 빛의 흡수가 일어나고 섬유용치 이물질에서는 라인 레이저의 빛이 확산되었다.

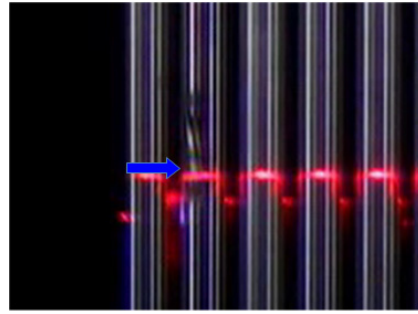


[Fig. 14] Images for foreign materials of fuel

연료봉이 파손된 경우, 라인 레이저 변화량이 미미하여 식별의 정확도가 필요하고 라인 레이저만으로 검출이 곤란하므로 3D 스캔 카메라의 데이터를 본 프로그램에 적용하여 해결하였고, masking filter 적용 기법을 추가적으로 개발하여 검사의 신뢰성을 향상시켰다. Fig. 15는 손상 연료봉을 나타내고, Fig. 16과 같이 변형, 손상 형태에 따라 라인 레이저로서 검출이 곤란한 경우가 발생하게 되고, Fig. 17과 같이 masking filter를 적용하여 난반사에 대하여도 쉽게 검출할 수 있는 결과를 얻었다.



[Fig. 15] Image for fracture of fuel assembly



[Fig. 16] Image captured by 3D scan



[Fig. 17] Image captured by masking filter

연료봉의 모든 검사가 중요하지만, 특히 연료봉 손상은 연료 필렛의 유출을 가져올 수 있는 중요한 손상으로서, 향후 이 masking filter 기법의 개발은 연료봉 집합체 검사에 대한 신뢰성 향상과 운전 안전성 확보의 중요한 기술이 될 것이다[11].

연료봉의 편차와 이물질 확인은 전후좌우 4개 면의 외곽 크기 편차와 이물질의 위치 등을 엑셀 데이터의 포맷으로 나타내어 정확한 위치 확인과 데이터베이스화가 가능하게 개발하여 원전 핵연료 집합체의 변형, 휨, 처짐, 손상, 탈락 등의 종합적인 상태를 검사하고 변화 추이를 분석하여 연료 집합체 취급 신뢰성과 안전성을 향상 시켰다.

성능시험은 설계, 제작한 실제 크기의 모의 핵연료 집합체 검사영상에 vision system을 적용하였고, 연료봉 찌그러짐, 그리드 손상, 처짐, 이물질 발생을 가정한 비정상 상태 연료봉 인식여부를 확인한 결과 비정상 상태 연료봉을 모두 검출하였다. 영상 검사 및 장비에 대한 성능시험의 결과를 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

[Table 2] Performance test for fuel inspection

No.	items	results
1	ID number	detected
2	foreign materials	inspected
3	1 st row deflection	inspected
4	2 nd row deflection	inspected
5	grid damage	inspected
6	fuel assembly fracture	inspected
7	printing	OK
8	3D rendering	OK

[Table 3] Performance test for equipment developed

No	items	results
1	inspection precision	±0.2mm(in air) ±0.5mm(in water)
2	moving speed	low: 20mm/s high: 83mm/s
3	stroke	4.6m
4	leakage	no leakage at 2 bar

4. 결론

검사 결과들을 데이터베이스를 구축하여 향후 연료집합체의 변형 거동을 조사함으로써 각 원자로별 노심 내 연료변형 패턴을 파악하여, 향후 연구자료 및 연료재장전 도중 발생 가능한 그리드 손상을 예방하는 기초자료로 사용할 수 있게 되었다.

따라서 본 원전연료 검사 및 이물질 제거 시스템을 통해 각 원전의 매주기의 계획예방정비 기간을 이용하여 원전연료의 변형 및 이물질 유무의 평가가 가능함에 따라 연료손상 예방 및 원전기기의 건전성을 유지할 수 있게 되었다.

원자력법에 의해서 시행되고 있는 연료 육안검사를 수행함에 있어서 기존 공정에 영향을 주지 않는 범위에서 개발된 검사시스템을 이용하여 육안검사를 수행함으로써 작업자의 피로를 낮추고 동시에 검사의 신뢰성을 향상시키고, 주기별로 핵연료의 변형 예측가능 데이터베이스를 구축하여 핵연료의 손상을 예방하고 연료봉 및 집합체 검사 신뢰성 향상과 원전운영의 안전성을 확보할 수 있다고 판단된다.

References

[1] W. Li, Z. Xiao, "Mechanism of Fuel Assembly Bowing in PWR and Preventive Measures", *Nuclear Power Engineering*, Vol. 29 No. 2, 2008.

[2] Y. K. Park. "Maintenance of Power Plant Facilities and Nondestructive inspection(II)- Nuclear Power Plants", *J. of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 4, pp.410-430, 2004.

[3] J. R. Price, J. D. Hunn, "Optical inspection of coated-particle nuclear fuel", *Progress in Biomedical Optics and Imaging*, Vol. 5303, No. 18, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.532393>

[4] Y. J. Shon, S.Y. Yang, "Test Evaluation of Eddy Current

in Fuel Rods", *J. of the Korean society for Nondestructive Testing*, Vol. 24 No. 5, pp. 284, 2004.

[5] Y. S. Lee, C. K. Kim, "Eddy Current testing using Encircling Differential Probe for Research Reactor Fuel Rods", *J. of the Korean society for Nondestructive Testing*, Vol. 21 No. 5, pp. 561-564, 2001.

[6] W. S. Kong, "Fabrication of ANF type Ultrasonic Senser and Resonance Application for Detecting Faults in PWR Fuel Rod", *J. of the Korean society for Nondestructive Testing*, Vol. 20 No. 7, pp.5-20, 2000.

[7] N. G. Park, S. K. Park, S. H. Baik, Y. J. Kang, "A preliminary study on noncontact imaging inspection for internal defects of plate-type nuclear fuel by using an active laser interferometer", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 256, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.11.015>

[8] M. Seifert, B. Brenner, F. Tietz, E. Beyer, "Pioneering Laser Scanning System for Hardening of Turbine Blades", *Laser Institute of America-Proceedings*, Vol. 87, No. 2, 1999.

[9] J. Yamada, "Three-Dimensional Measurement with a Scanning Parallel Laser Beam", *Review of Laser Engineering-Laser Society of Japan*, Vol. 22, No. 12, 1994

[10] D. Aluze, F. Merienne, C. Dumont, P. Gorria. "Vision system for defect imaging, detection, and characterization on a specular surface of a 3D object", *Image and vision computing*, Vol. 20, No. 8, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00046-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00046-X)

[11] J. Lemons, "Fuel Assembly Inspection Program", *Nuclear Plant Journal*, Vol. 26, No. 1, 2008.

박 기 태(Ki-Tae Park)

[정회원]



- 1987년 2월 : 부경대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2004년 2월 : 동명대학교 로봇시스템공학과 (공학석사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한전KPS원자력정비기술센터(수석연구원)

<관심분야>
기계, 로봇, 자동화

노 태 정(Tae-Jung Lho)

[정회원]



- 1984년 2월 : 부산대 기계설계학과 (공학학사)
- 1986년 2월 : KAIST 생산공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : KAIST 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1986년 2월 ~ 1999년 2월 : 삼성중공업 기전연구소 (수석연구원)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 교수

<관심분야>

Mechatronics, Robotics, 기계 제어, 자동화 등