

핵연료봉 중간검사를 위한 장탈착 툴 개발

홍진태*† · 허성호* · 김가혜* · 박승재* · 정창용*

* 한국원자력연구원 연구로이용연구본부

Development of Disassembly Tool for Intermediate Examination of Nuclear Fuel Rods

Jintae Hong*†, Sung-Ho Heo*, Ka-Hye Kim*, Sung-Jae Park* and Chang-Young Joung*

* Dept. of Research Reactor Applications, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received November 7, 2013 ; Revised January 6, 2014 ; Accepted January 21, 2014)

Key Words: Intermediate Examination of Nuclear Fuel Rod(핵연료봉 중간검사), Nuclear Fuel Irradiation Test(핵연료 조사시험), Assembly/Disassembly of Nuclear Fuel Rod(핵연료봉 장탈착)

초록: 조사시험 도중 핵연료의 특성변화를 확인하기 위하여 원자로 수조내에 위치한 조사리그로부터 핵연료봉을 분리한 후 핫셀로 이송하여 중간검사를 진행한다. 또한 중간검사를 마친 핵연료봉은 원자로의 작업 수조로 이동시켜 조사리그에 재장착을 하게 되며, 재조립된 조사리그는 원자로 노심의 조사리그에 장착시켜 조사시험을 계속 진행한다. 그러나 중성자 조사가 진행된 핵연료봉은 높은 에너지의 방사선을 방출하기 때문에 작업자가 방사선에 피폭되지 않게 하기 위하여 핵연료봉 장탈착 공정은 원자로 작업수조수 내에서 이루어져야 한다. 특히 조사리그의 길이가 5.4 미터이고, 핵연료봉의 장탈착 작업이 이루어질 하나로 작업수조수의 깊이는 6 미터로 매우 깊어 장탈착 작업을위한 특수한 장치가 필요하다. 본 연구에서는 중간검사가 가능한 새로운 핵연료봉 조립체를 설계하고, 조사 핵연료봉 조립체의 장탈착용 툴을 개발하여 노외 성능시험을 통해 그 성능을 검증하였다.

Abstract: To check the characteristics of nuclear fuels during an irradiation test, the nuclear fuel rod needs to be disassembled from the test rig located in the pool of the research reactor. Then, the disassembled fuel rod is delivered to the hot cell for intermediate examination. A fuel rod that passes the intermediate examination is delivered to the reactor pool to be reassembled into the test rig. The irradiation test is resumed with the reassembled test rig. Because nuclear fuel rods irradiated by neutrons are highly radioactive, all the disassembly and reassembly processes should be carried out in the pool of the research reactor to prevent operators being exposed to radiation. In particular, because a test rig is 5.4-m long and the reactor pool of HANARO is 6-m deep, special tools need to be developed for performing the disassembly and reassembly processes. In this study, a new assembly design of nuclear fuel rods for intermediate examination is introduced. Furthermore, tools for treating the irradiated fuel rod assembly are introduced, and their performance is verified by an out pile test.

1. 서론

새로운 핵연료를 개발할 때 핵연료의 연소성능 및 피복관의 산화막 형성 등을 분석하기 위하여 핵연료봉 및 조사리그(Test rig)를 제작한 후 연구로의 루프(Loop)에 장착하여 조사시험을 진행한다.

루프는 원전의 수질과 동일한 환경하에서 핵연료봉에 중성자를 조사시키면서 핵연료의 성능을 실시간으로 측정할 수 있도록 하는 설비로서 한국원자력연구원 HANARO에는 별도의 순환루프인 FTL(Fuel test loop)이 설치되어 있다. FTL의 IPS(In-pile test section)에는 핵연료봉과 조사중 핵연료의 거동을 측정하기 위한 센서들이 부착된 조사리그가 장착되어 있다. 특히 조사중인 핵연료의 거동을 실시간으로 측정하는 것 외에 피복관의 수명

† Corresponding Author, jthong@kaeri.re.kr

또는 안전성 분석을 위해 부식거동을 관측할 필요가 있다. 피복관의 부식거동은 산화막 두께측정과 피복관 재료의 사진 판독으로 구성된 중간검사를 통해 평가할 수 있으며, 이를 위해 일정주기의 조사후 핵연료봉을 핫셀(Hot cell)로 이동하여 핵연료봉 외경 변화를 측정할 필요가 있다. 중성자에 의해 조사된 핵연료봉은 방사능을 띄고 있어 손으로 분해하는 것은 불가능하기 때문에 작업자가 방사능에 노출되지 않도록 하기 위해 모든 분해 조립 작업은 HANARO 작업수조수 내에서 이루어져야 한다.

지금까지의 연구들은 주로 원자력발전소의 핵연료 집합체의 검사 및 수리를 위한 대형 장치들에 집중되어 있으며, 핵연료 집합체의 상판을 열고 핵연료봉을 개별적으로 인출하는 장치들에 관한 것이다.⁽¹⁻⁵⁾ 또한 Goswami⁽⁶⁾는 핵연료봉 중간검사를 위해 조립체의 지지부를 레이저 가공으로 절단하여 분리하는 장치를 개발하였으나 이러한 기술들은 핵연료봉 조립체가 센서나 신호선이 계장되지 않은 무계장(Non-instrumented) 핵연료봉으로만 구성되어 있을 때 가능하다.

HANARO 노심의 구조 및 FTL의 구조 특성상 조사리그의 길이는 5.4 m로 제작되며 조사리그에서 핵연료봉을 분해·조립할 장소인 작업수조의 깊이는 5.5 m 이므로(Fig. 1) 수조수 밖에서 길고 특수하게 제작된 장치를 이용하여 핵연료봉의 분해 조립이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 조사리그에서 무계장 핵연료봉의 장탈착 설계 및 분해조립을 위한 툴을 개발하고 그 성능을 검증하도록 한다.

2. 장탈착 핵연료봉 설계

핵연료 조사리그는 루프와 연결되어 별도의 냉각수 순환구조를 통해 냉각되며, 핵연료봉 장착부

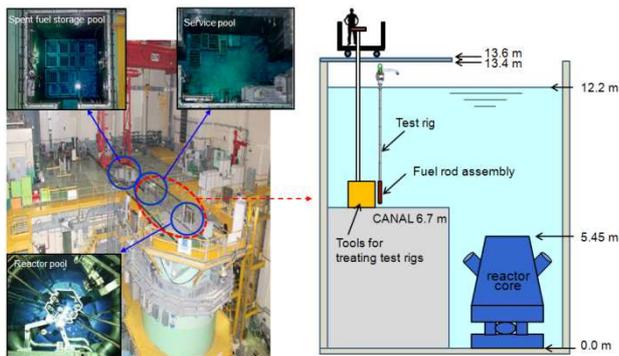


Fig. 1 Reactor pool of HANARO and space for disassembling the fuel rod assembly

는 중성자 조사를 위해 노심에 장착되어야 하므로 Fig. 2(b)와 같은 구조를 갖는다. 기존의 핵연료봉 조립체는 Fig. 2(c)의 왼쪽 그림과 같이 분리되지 않는 구조로 개발되어 왔으나, 본 연구에서는 조사시험 중간에 장탈착이 가능하도록 하기 위해 Fig. 2(c)의 오른쪽 그림과 같이 2 단으로 설계를 변경하였다. 즉, 핵연료봉 조립체에서 위쪽에 배치되는 계장 핵연료봉 조립체는 열전대, LVDT 등의 계장 센서와 연결되어 조사시험 중 실시간으로 핵연료 거동을 측정하도록 하며, 조사리그에 완전히 고정시킨다. 반면 아래쪽에 배치되는 무계장 핵연료봉 조립체는 피복관의 부식 성장률 측정 등의 검사를 위해 조사시험 중간에 주기적으로 핫셀로 이동하여 측정이 이루어져야 한다. 따라서 무계장 핵연료봉 조립체는 장탈착이 가능한 구조로 설계되며 센서를 부착하지 않는다.

특히 중간검사를 위한 장탈착 작업은 모두 HANARO 작업수조수 내에서 이루어지므로 간편하게 장탈착이 가능하고 조사시험 중 유체유발진동 (Fluid induced vibration)에 의해 임의로 분리되거나 공진이 발생하지 않도록 베이어닛 체결구조(Bayonet coupling mechanism)와 체결버튼 구조(Lock button mechanism)를 함께 적용하여 Fig. 3과 같이 설계하였다. Fig. 3(a)는 계장 핵연료봉 조립체와 무계장 핵연료봉 조립체를 연결하는 조립플러그(Assembly plug)의 3D 모델링으로서 각각 계장 핵연료봉 조립체와 무계장 핵연료봉 조립체를 지지하는 기능을 포함하고 있으며, 각 조립체에는 3 개의 핵연료봉이 장착된다.

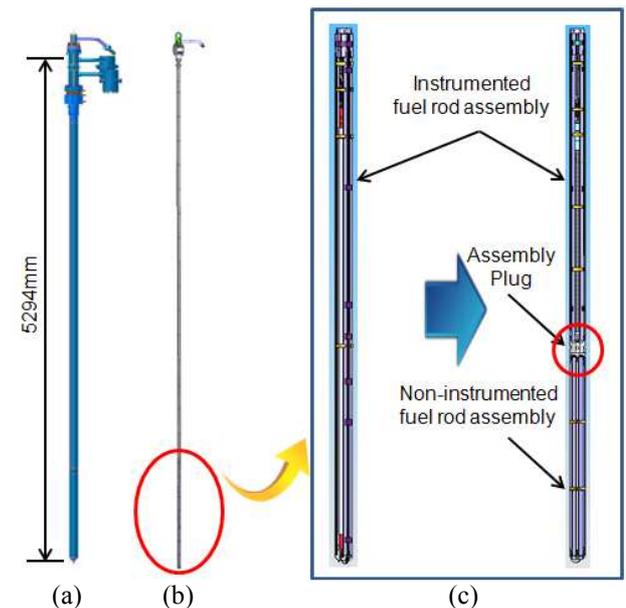


Fig. 2 Modeling of a test rig (a) IPS (b) Test rig (c) Fuel rod assembly

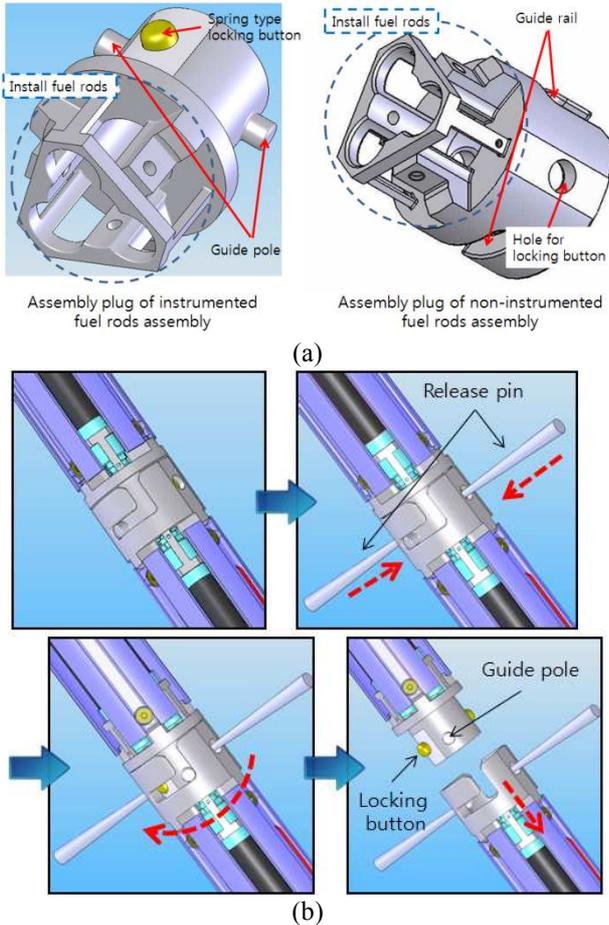


Fig. 3 Modeling and assembly sequence of the fuel rod assembly (a) Modeling of assembly plug (b) Disassembly sequence of non-instrumented fuel rod assembly

계장 핵연료봉 조립체로부터 무계장 핵연료봉 조립체의 분리하는 과정은 Fig. 3(b)와 같다. 먼저 계장 핵연료봉 조립체의 조립플러그양 끝에 있는 체결버튼(Locking button)을 눌러 무계장 핵연료봉의 회전운동에 대한 잠금을 해제한 후 무계장 핵연료봉 조립체를 가이드 레일(Guide rail)을 따라 회전시켜 축방향으로 잡아당기면 계장핵연료봉 조립체로부터 무계장 핵연료봉 조립체가 분리된다.

본 설계안의 검증을 위해 실제 핵연료 조사리그 용 소재와 동일한 AISI 316L 소재를 이용하여 핵연료봉 조립체 목업을 제작하였다. Fig. 4 는 목업 제작품인 무계장 핵연료봉 조립체를 계장핵연료봉 조립체에서 분리하는 순서를 나타낸다.

3. 핵연료봉 조립체 장탈착 틀 개발

3.1 장탈착 틀 개발

핵연료봉의 조사시험중 중간검사를 위한 장탈착 취급틀의 작동은 하나로의 작업수조수 내에서 진

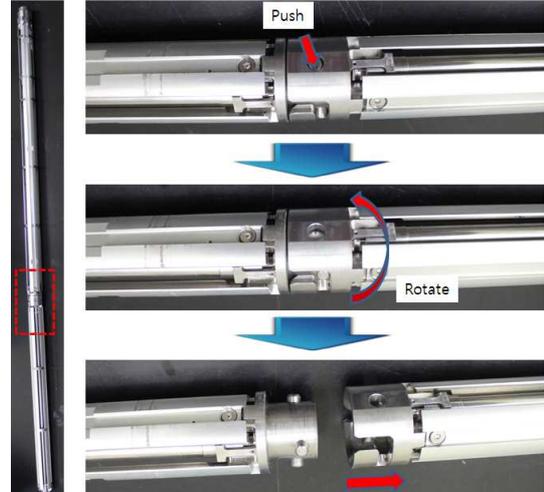
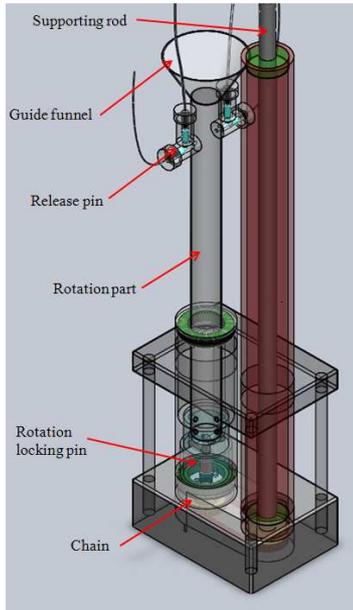


Fig. 4 Sequence of disassembling an instrumented fuel rod assembly with a non-instrumented fuel rod assembly

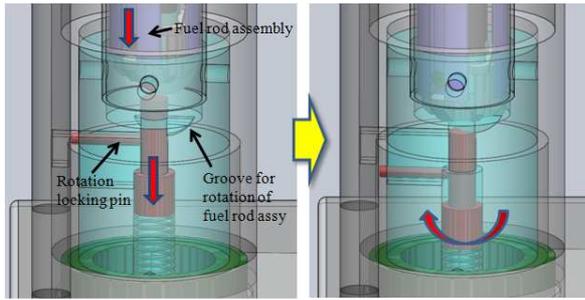
행되므로 수질 오염 방지 및 부식 방지를 위하여 모든 부품의 소재는 AISI 316L 과 Al6061 을 이용하여 제작하였으며 Fig. 5 는 장탈착 틀의 3D 모델링이다. 본 장치는 회전 운동부, 체결버튼 구동부, 회전 구동부의 세부분으로 나뉜다. Rig 에 부착된 무계장 핵연료봉 조립체의 장탈착은 6 m 이상의 먼 거리에서 이루어지므로 체결버튼을 구동할 정확한 위치를 찾기 위해서는 자동화 메커니즘을 적용해야 한다. 즉 핵연료봉 조립체가 장탈착틀의 회전 운동부 내에 삽입되었을 때 비대칭 형상인 무계장 핵연료봉 조립체의 바닥부가 장탈착틀의 회전운동부 바닥면 홈(Groove)에 정확히 체결될 경우 회전 방지 잠금이 해제되면서 회전운동부의 회전이 가능해진다. 또한 이 경우 해제핀(Release pin)과 핵연료봉 조립체의 체결버튼과의 위치가 정확히 일치하도록 설계하였다. 체결버튼 구동부는 와이어(Wire)로 연결된 두 개의 레버(Lever)에 의해 작동/풀림이 되며, 작동레버(Operating lever)를 당기면 핵연료봉 조립체의 체결버튼이 안쪽으로 밀려 들어감으로써 무계장 핵연료봉 조립체의 회전이 가능해진다. 회전 구동부는 조사리그가 고정된 상태에서 무계장 핵연료봉 조립체만 회전시킬 수 있도록 설계되어 있으며 이로써 조사리그와 무계장 핵연료봉 조립체를 분리시킬 수 있다.

3.2 노외 성능시험

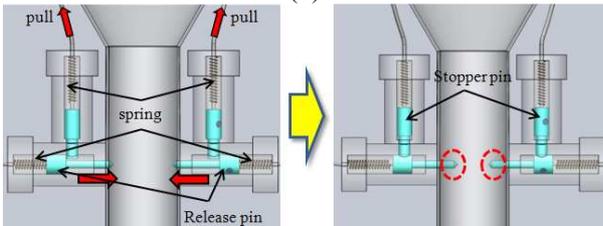
이상에서 제작된 장탈착 장치들을 HANARO 내에 투입하기 전 그 성능을 검증하기 위하여 HANARO 와 동일한 조건에서 노외 성능시험을 수행하여야 한다. 우선 3D 모델링을 이용하여 조사리그로부터 무



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Disassembly tool for a nuclear fuel rod assembly (a) 3D modeling (b) Mechanism of a rotation lock pin in the rotation part (c) Release pin part (d) Rotation driving part

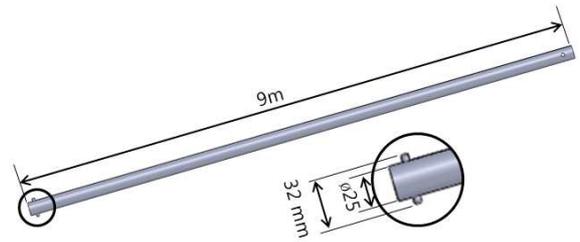


Fig. 6 Modeling of an ejection tool

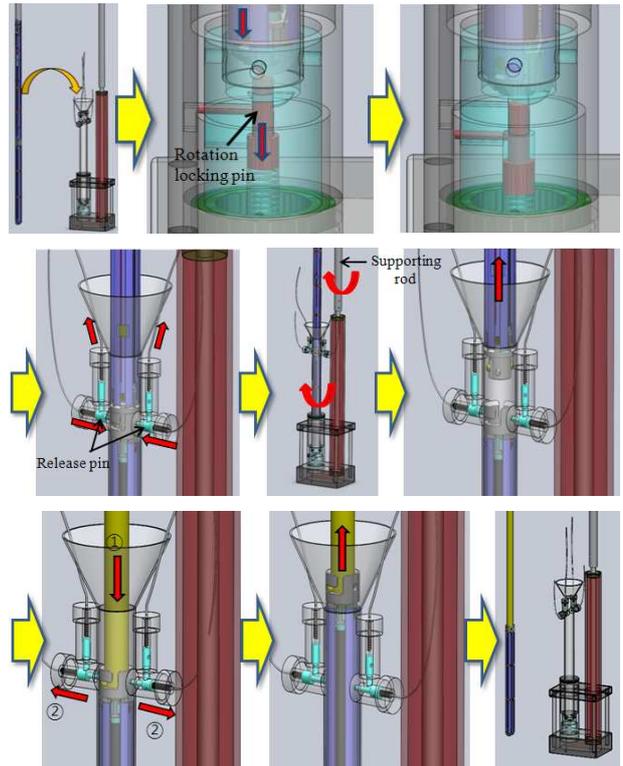


Fig. 7 Sequence of disassembly of the non-instrumented fuel rod assembly from a test rig

계장 핵연료봉 조립체의 탈착을 위한 작업 순서를 시뮬레이션 하였으며, 그 내용은 Fig. 7 과 같다.

- 1) 고정레버(Fasten lever)를 잡아당겨 해제핀이 후퇴하여 있는지 확인한다.
- 2) 조사리그의 무계장 핵연료봉 조립체를 장탈착틀의 회전운동부에 삽입한다.
- 3) 무계장 핵연료봉 조립체의 끝 장착부가 장탈착틀 회전운동부의 홈에 장착되어 회전체결버튼(Rotation locking pin)을 해제시킨다.
- 4) 해제레버(Release lever)를 잡아당겨 해제핀을 작동시킨다.
- 5) 조사리그를 고정하고 회전 구동부의 지지봉을 시계방향으로 60도 회전시킨다.
- 6) 조사리그를 들어올려 조사리그와 무계장 핵연료봉 조립체가 분리되도록 한다.

- 7) 인출용 틀을 장탈착 틀의 회전운동부 내에 투입하여 무게장 핵연료봉 조립체의 조립플러그에 가공되어 있는 가이드레일을 따라 조립한다.
- 8) 고정레버를 잡아당겨 해제핀을 후퇴시킨다.
- 9) 무게장 핵연료봉 조립체를 장탈착틀에서 꺼내 핫셀로 이동하기 위해 방사선 차폐 통(Cask)^(7~10)에 담는다.

중간검사가 완료된 무게장 핵연료봉 조립체는 다시 HANARO의 작업수조로 이동시킨 후 조사리그에 재장착하고, IPS의 압력관에 재조립하여 조사시험을 계속해야 한다. HANARO 작업수조로 이송된 무게장 핵연료봉 조립체를 조사리그에 재장착하는 순서는 위의 핵연료봉 조립체 탈착 프로세스의 역순으로서 다음과 같다.

- 1) 고정레버를 잡아당겨 해제핀이 후퇴되어 있는 상태인지 확인한다.
- 2) 인출용 틀을 이용하여 핵연료봉 운송용 방사선 차폐 통에서 무게장 핵연료봉 조립체를 꺼내 장탈착틀의 회전운동부에 넣는다.
- 3) 무게장 핵연료봉 조립체의 조립플러그에 가공되어 있는 가이드레일을 따라 인출용 틀을 분리한다.
- 4) 무게장 핵연료봉 조립체가 분리되어 보관중인 조사리그를 들어 장탈착틀의 회전운동부에 삽입하고, 무게장 핵연료봉 조립체의 조립플러그에 가공된 가이드레일을 따라 조립한다.
- 5) 조사리그가 회전하지 않도록 고정하고, 회전구동부의 지지봉을 시계 반대방향으로 60도 회전시켜 무게장 핵연료봉 조립체를 조사리그에 고정시킨다.
- 6) 회전구동부의 지지봉을 조금씩 돌려보며 무게장 핵연료봉 조립체가 조사리그에 완전히 조립되었는지 확인한다.
- 7) 조립이 완료된 조사리그를 장탈착틀에서 꺼내어 IPS의 압력관에 조립하고 조사시험을 재시작한다.

Fig. 5와 같은 설계로 제작된 장탈착 장치를 이용하여 Fig. 9와 같이 실험실내에서 무게장 핵연료봉 조립체의 장탈착에 대한 기초 성능실험을 진행하였다. 실험은 10회 반복하였으며(Table 1), 3회 반복시험 시 조립나사의 풀림으로 인해 고정레버가 동작하지 않는 문제가 발생하였다. 따라서 와이어 고정을 스크류 방식에서 용접방식으로 변경하였으며, 반복 실험시 추가적인 문제없이 장탈착 실험이 완료되었다.

Table 1 Result of disassembly experiment in a laboratory

No.	Result	No.	Result
1	Pass	6	Pass
2	Pass	7	Pass
3	Fail (loosen wire)	8	Pass
4	Pass	9	Pass
5	Pass	10	Pass

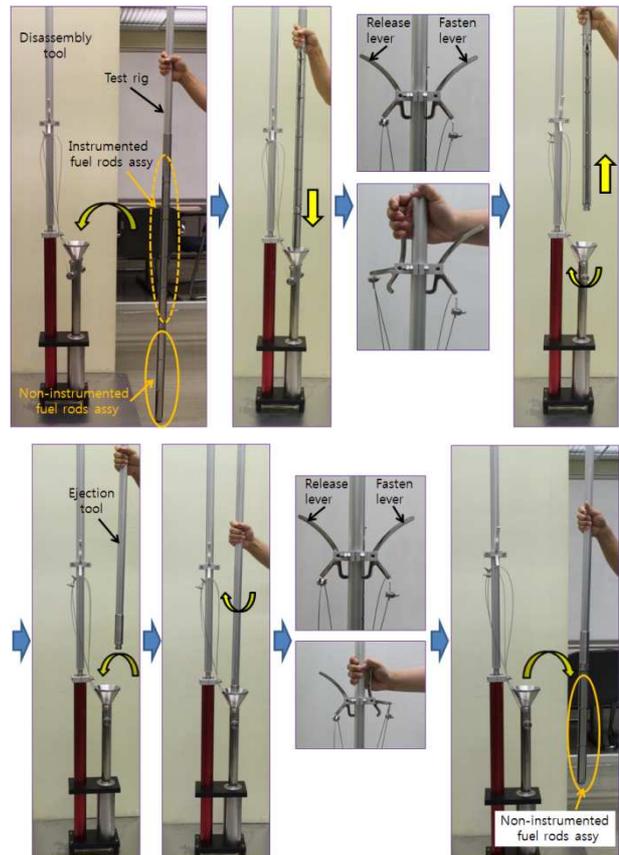


Fig. 8 Sequence of preliminary disassembly experiment in a laboratory

위의 기초실험결과를 바탕으로 한국원자력연구원의 엔지니어링 실험동 조사시험 노의 실험장치에서 Fig. 9와 같이 실제와 동일한 규모의 노의 성능실험을 진행하였다. 조사리그 및 인출용 틀의 무게가 각각 150kg_r, 50kg_r으로서 작업자가 직접 이송하는 것은 어려우므로 크레인을 이용하였다. 무게장 핵연료봉 조립체의 장탈착 실험은 10회 반복하여 수행하였으며, 실험 결과 모든 부품이 이상없이 잘 동작하였다. 장탈착 실험은 위의 공정 순서에 따라 진행하였으며 부품 파손이나 작동 오류 없이 정밀하고 안전하게 완료되었다.

이상의 실험 결과로서 무게장 핵연료봉 조립체

의 장탈착 설계 구조 및 장탈착 툴이 문제없이 잘 설계되었으며, 제작된 장치 역시 장탈착 성능과 반복성에 문제없이 잘 동작함을 확인하였다.

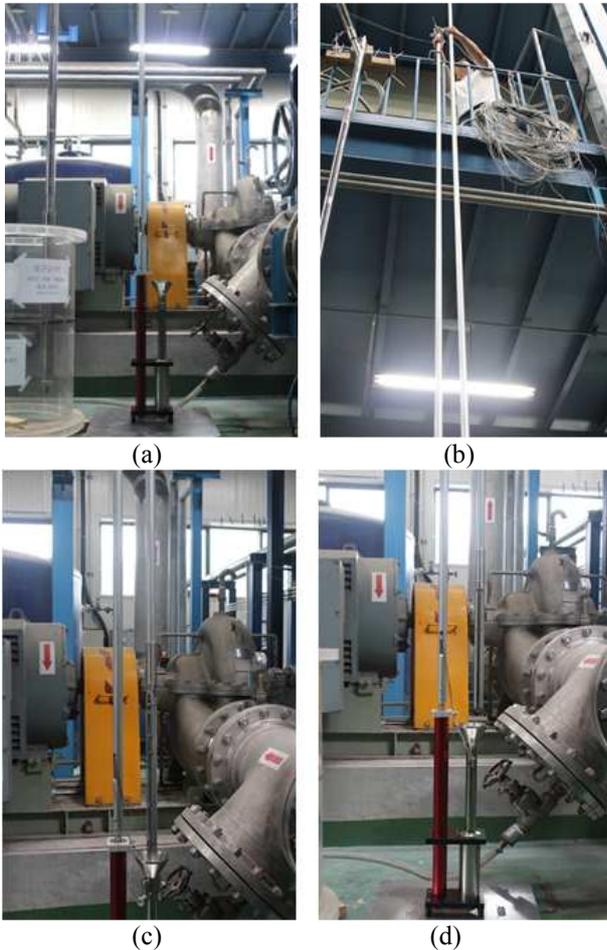


Fig. 9 Disassembly experiment in the engineering facility (a) Set up of the disassembly tool (b) Lift a test rig to put into the disassembly tool (c) Disassemble the test rig from the non-instrumented fuel rod assembly (d) Eject the non-instrumented fuel rod assembly

4. 결론

본 연구에서는 조사시험중 핵연료봉의 중간검사를 위해 장탈착 가능한 핵연료봉 조립체 구조를 설계하고, HANARO 작업수조 내에서 작업하기 위한 특수한 장탈착 툴 및 이를 활용한 장탈착 공정을 개발하였다.

(1) 계장 핵연료봉 조립체와 무계장 핵연료봉 조립체 및 이의 연결구조를 설계하였다.

(2) HANARO 작업수조 내에서 조사리그로부터 무계장 핵연료봉 조립체를 분리 및 재장착 할 수 있는 장치를 개발하였다.

(3) 개발된 장탈착 툴을 이용하여 무계장 핵연료봉 조립체를 분리 및 재장착하는 공정을 개발하였다.

(4) 실험실내의 기초 동작 실험과 엔지니어링 실험건물에서 실제 크기로 노외 성능실험을 실시하고 개발된 툴의 동작 성능 및 반복성을 확인하였다.

무계장 핵연료봉 조립체의 분리 및 재장착 실험 결과 핵연료봉 조립체 구조 및 장탈착 툴이 부품이나 장치의 파손없이 잘 동작하는 것을 확인하였으며, 목표 성능을 만족시키면서 작업자들이 쉽고 안전하게 작업이 가능함을 확인하였다. 즉, 본 연구에서 개발된 장탈착 툴의 대기중 노외 성능실험 결과를 통해 본 장치가 HANARO 작업수조 내에서 무계장 핵연료봉 조립체의 장탈착 작업에 충분히 활용될 수 있음을 확인하였다. 향후 수중 노외 성능 시험 및 HANARO 작업수조수 내에서의 성능 시험을 통해 개발된 장치의 최종적인 성능 및 신뢰성을 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 원자력연구개발사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Ruggirello, G. and Zaverucha, A., 1997, "Applied Monitoring Methods for the Control of Fuel Elements and Reactor Internals in Argentine Nuclear Power Plants Poolside Facilities," *IAEA-TECDOC-1050*, pp. 7~12.
- (2) Knecht, K., 1997, "New Inspection and Reconstitution Techniques for Fuel Assemblies Increase Power Plant Efficiency," *IAEA-TECDOC-1050*, pp. 15~27.
- (3) Leroy, G., 1997, "Framatome Experience in Fuel Assembly Repair and Reconstitution," *IAEA-TECDOC-1050*, pp. 61~69.
- (4) Park, J. Y., 1997, "PWR Fuel Inspection and Repair Technology Development in the Republic of Korea," *IAEA-TECDOC-1050*, pp. 101~113.
- (5) Knecht, K. and Kraus, K., 1987, "Method and Device for Repairing Fuel Assemblies of Boiling-Water Nuclear Reactors," US Patent, No. 4697322.
- (6) Goswami, G. L., Chatterjee, A., Chandra, M., Kulkarni, H.B., Prasad, K. K., Jayarajan, K., Mishra, J. K., Kumar, S., Gangotra, S., Sahoo, K. C. and Nathan, T. P. S., 2004, "Development of Automatic Remotely Operable Laser Cutting System for Disassembly of

- PHWR Spent Fuel Bundles,” *BARC Newsletter*, Issue No. 249, pp. 116~122.
- (7) Ku, J. H., Seo, K. S., Kang, H. Y. and Kim, Y. J., 1995, "A FEM Analysis of the Dynamic Behavior of Spent Nuclear Fuel Transport Cask Under Oblique Drop Impact," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 19, No. 12, pp. 3252~3259.
- (8) Hong, D. H., Jung, J. H., Kim, H. D., Yoo, K. S., Lee, Y. P. and Lee, W. K., 2008, "Development of Transportation & Loading Device for Spent Nuclear Fuel Rod Cuts," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 785~786.
- (9) Hong, D. H., Jin, J. H., Jung, J. H., Kim, K. H. and Yoon, J. S., 2005, "Development of Transportation Capsule for Spent Nuclear Fuel Rod Cuts," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 1055~1058.
- (10) Chung, S. H. and Lee, Y. S., 1997, "A Study on the Side Drop Impact of a Nuclear Spent Fuel Shipping Cask," *Trans. of the KSME A*, Vol. 21, No. 3, pp. 457~469.
- (11) Hong, J. T., Ahn, S. H., Joung, C. Y. and Kim, K. H., 2013, "Nuclear Fuel Rod Assembly and Device of Installation/Separation Thereof," KHNP, KR 10-2013-0098690.