

PHEBUS FPT0 실험 PIE결과를 통한 노심 손상 후기 과정 분석

박래준, 김상백, 김희동

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

PHEBUS FPT0 노내실험의 핵연료 다발에 대한 실험후 비파괴 검사 및 파괴 검사 결과를 분석하여 노심손상 후기과정을 정밀 분석하였다. 분석한 비파괴 검사결과는 gamma scanning, radiography, tomographies 였으며 파괴검사 결과는 정밀사진, metallography, Electron Probe Micro Analysis(EPMA) 였다. 그 결과, PHEBUS-FPT0 실험에 사용한 핵연료다발은 기존에 수행된 어떤 다른 노내실험의 핵연료다발보다 많이 용융되었으며 용융 pool 및 피막층의 형성, 용융물 내부의 자연대류 열전달과 이에 따른 shroud 물질 손상, 핵연료다발 물질들간의 eutectic 형성 등을 보여주었다. 특히 Ag-In-Cd 제어봉 물질과 stainless-steel이 핵연료봉 물질과 반응하여 이들의 용융온도를 낮게하여 실험 예측값보다 많이 핵연료다발이 손상되어 기존 중대사고 해석 전산코드의 개선이 요구되었다.

1. 서론

본 연구에서는 현재 세계에서 가장 활발하게 수행하고 있는 노내(in-vessel) 종합 중대사고 실험 프로그램인 PHEBUS FP의 첫번째 실험으로서 1993년 12월에 수행된 FPT0 실험의 핵연료 다발에 대한 실험후 비파괴 검사 및 파괴 검사 결과를 분석하여 노심손상 후기과정(late phase melt progression)을 정밀 분석하였다. PHEBUS-FP는 프랑스와 유럽공동체의 주관하에 미국, 캐나다, 일본, 한국이 참여한 국제 공동연구 프로그램으로서 중대 노심손상 사고시 핵연료 용융과정과 핵연료봉에서의 핵분열 생성물 방출과정 및 원자로 냉각재 계통과 격납용기 내에서의 핵분열 생성물 이송과정을 연구하는 노내 중대사고 실험을 수행하는 것이 목적이다[1].

PHEBUS FP 노내실험은 프랑스 Cadarache 원자력 연구소에 있는 PHEBUS 원자로에서 기존에 수행된 노심손상 노내실험인 PBF(Power Burst Facility)-SFD(Severe Fuel Damage)[2], PHEBUS-SFD[3], FLHT(Full Length High Temperature)[4], ACRR(Annular Core Research Reactor)-DF(Debris Formation)[5], LOFT-FP[6] 등의 실험들보다 노심이 더 심하게 손상되는 중대 노심 손상사고시 핵연료 손상과정을 규명하고 핵분열 생성물의 방출과 거동 및 이송을 분석하기 위하여 열수력 조건과 핵연료 초기조건에 따라 총 6번의 실험을 수행하는 것이다. 이 프로그램의 첫번째 실험인 FPT0은 1993년 12월에 수행되었으며 두번째 실험인 FPT1은 1996년 7월에 수행되었다.

본 연구에서는 PHEBUS FPT0 실험의 핵연료다발에 대한 PIE(Post Irradiation Examination) 결과 분석을 통하여 노심손상 후기과정을 중점적으로 규명하였다. 즉, 핵연료 용융 후의 용융물 거동인 용융물과 다른 물질과의 반응, 용융 pool의 형성과 성장 및 거동, 용융물의 고화에 의한 피막층 형성, 노심파편층(debris bed) 형성, 핵연료봉 다발을 보호하기 위하여 설치한 shroud 물질이 용융 핵연료로 인하여 손상되는 과정 등을 중점적으로 분석하였다. 핵연료다발 물질의 용융 후 실험용기 내에서 발생한 현상을 규명하기 위해서는 많은 측정 결과들이 필요하나 PHEBUS FPT0 실험에서는 용융물의

거동을 규명할 수 있는 직접적인 측정장치가 없었으며, 중요한 정보를 제공할 수 있는 노심의 온도를 측정하는 열전대도 노심용융 후 손상되어 측정결과를 얻을 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 radiography, tomographies, gamma scanning의 비파괴 PIE 결과, 절단후의 정밀 사진, metallographies, EPMA 등의 파괴 PIE 결과 등을 종합적으로 분석하였다.

2. PHEBUS FPTO 실험

PHEBUS FPTO 노내실험은 그림 1에서 보는 바와 같이 20개의 새 핵연료봉과 1개의 Ag-In-Cd 제어봉으로 구성된 핵연료다발을 사용하여 1993년12월에 성공적으로 수행되었다. 이 실험은 PHEBUS 원자로에서 핵연료 다발을 9일간 irradiation시키는 시기와 과도상태 및 격납용기에서의 핵분열 생성물과 에어로졸의 거동 등으로 구분하여 수행되었다. 이 실험의 과도상태는 실험수행 전의 예측보다 핵연료가 많이 손상되어 실험 수행 안전인자를 위협하였기 때문에 최대 원자로 출력이 계획한 20 MW(핵연료다발 출력 : 90 kW)보다 낮은 약 7 MW(핵연료다발 출력 약 51 kW)였으며, 과도상태 기간도 계획시간 16,000 초보다 늦은 18,150초까지 지속되었다[7].

FPTO 실험후 핵연료다발은 PHEBUS 실험시설 내에 있는 PEC(Poste d'Examens et de Controle) 시설에서 gamma scannings, radiography, tomographies의 비파괴 PIE가 수행된 후, PHEBUS FP 건물 지하의 방사능 실험실로 이송되었다. 이 실험실에서는 핵연료다발을 핵연료가 있는 노심과 상부로 구분하여 절단하고, 노심부분의 핵연료다발은 epoxy로 절연한 후 파괴 PIE를 수행하기 위하여 Saclay 연구소의 방사능 실험실로 이송되었다. 이 실험실에서는 비파괴 PIE 결과인 tomographies를 기초로 하여 핵연료다발을 다이아몬드 톱을 이용하여 20개 단면으로 절단하였으며, macrographs, micrographs, metallographs, EPMA 등의 파괴 PIE를 수행하였다[8]. FPTO 핵연료다발의 하부인 높이 15.1 cm 부터 17.3 cm 까지는 독일의 EU/JRC TUI 연구소로 이송되어, 핵연료에 남아있는 핵분열 생성물, 노심용융물의 열역학적 물성치, 노심용융물의 성분 등을 분석하기 위한 종합적인 파괴 PIE를 수행하였다. FPTO 실험후 노심 상부와 핵분열 생성물 측정장치들은 프랑스 PHEBUS 격납용기 하부에 있는 CECILE 방사능 실험실, 프랑스 Grenoble 연구소의 LAMA 방사능 실험시설, 영국 AEA Winfrith로 각각 이송되어 원자로 냉각재 계통과 격납용기에서의 핵분열 생성물과 에어로졸 거동 분석을 위한 PTA(Post Test Analysis)를 수행하였다[9].

3. 비파괴 PIE 결과 분석

PHEBUS FPTO 핵연료다발에 대한 비파괴 PIE는 Zr 95, Ag 110m, Co 60 등의 물질을 이용하여 핵연료다발 물질의 축방향 질량분포를 조사하는 gamma scanning, linear accelerator와 전자 카메라를 이용하여 핵연료다발의 측면 사진을 촬영하는 tomographies, 이들을 이용하여 핵연료다발의 수직면 사진을 촬영하는 radiography가 수행되었으며 그림 2가 이들 결과를 종합적으로 보여주고 있다. FPTO 핵연료다발의 Zr-95에 대한 gamma scanning 결과에서 보는 바와 같이 핵연료다발 내의 상부 zircaloy 물질이 약 20 cm 높이에 가장 많이 재배치되었다. 제어봉 물질인 Ag-110m에 대한 gamma scanning 결과에서 보는 바와 같이 약 20 cm부터 1 m까지의 제어봉 물질이 모두 용융하여 대부분이 20 cm 이하의 하부로 재배치되었으며, 일부는 에어로졸로 되어 상부로 배출되었다. 이 실험의 과도상태중 용융물의

재배치에는 하부 spacer grid가 많은 영향을 미쳤다. 즉, 용융pool은 spacer grid의 상부에 오랫동안 형성되어 자연대류 열전달로 이 지점 상부의 shroud 물질이 많이 손상된 것으로 나타났다.

FPT0 실험에서 핵연료다발 물질의 용융량을 평가하기 위하여 이들 물질의 축방향 질량 분포를 비파괴 PIE 결과인 tomographies를 이용하여 계산하였다. 계산 방법은 FPT0 핵연료다발내 각 핵연료봉에 숫자를 부여하고 각 봉에 대하여 tomographies에 나타난 면적을 구하는 것이다. 그 결과, 핵연료 용융량은 핵연료다발 내의 전체 핵연료량인 10.533 kg의 약 50 %인 5 kg이 용융되어 실험 수행 전에 예측하였던 약 20 % 이하보다 매우 크게 나타났다. 이와 같이 PHEBUS FPT0에서의 핵연료 용융량은 이전에 수행되었던 어떤 다른 노내실험보다도 핵연료가 많이 용융된 것으로 나타났다. 참고로 SFD-ST실험에서는 핵연료량의 약 15 %, SFD 1-1 실험에서는 약 16 %, SFD 1-3 실험에서는 약 18 %, SFD 1-4 실험에서는 약 18 %, LOFT FP2 실험에서는 약 15 %, DF1 실험에서는 약 15 %, DF2 실험에서는 약 22 %, DF3 실험에서는 약 10 %, 실제 사고인 TMI-2에서는 약 45 %가 용융되었다.

FPT0 핵연료다발에 대한 비파괴 PIE 결과를 분석한 결과 상당히 많은 양의 내부 shroud 물질이 손상되었으며 약 29 cm 높이에서는 내부 shroud 뿐만아니라 북서 방향의 외부 shroud 도 많이 손상되어 약 0.7 cm 두께의 피막층이 형성된 것을 확인하였다. 전체 용융 핵연료의 약 50 %인 2.5 kg이 용융 pool을 형성하였으며 이는 전체 핵연료봉다발 내에서 약 6 cm 높이의 용융 pool이므로 용융물의 자연대류 열전달이 충분히 발생될 수 있다. 또한 핵연료다발의 다른 물질까지를 포함하면 용융 pool의 깊이가 약 10 cm로 나타나 용융물의 자연대류 영향이 크게 나타날 수 있다.

4. 파괴 PIE 결과 분석

FPT0 핵연료다발에 대한 비파괴 PIE가 수행된 이후 정밀 사진, metallographies, EPMA 등의 파괴 PIE가 수행되었다. 그림 3은 FPT0 실험의 핵연료다발에 대한 정밀 사진 결과를 보여주고 있다. FPT0 실험에서 최종적으로 형성되었던 용융 pool의 중상부인 23.4 cm 높이에서는 거의 모든 핵연료다발 영역이 다공성을 가진 용융된 핵연료다발 물질이 존재하였으며 서쪽에 굴뚝 모양의 유로가 형성되었다는 것을 확인할 수 있다. 서쪽 지역의 외곽에는 유로 때문에 피막층이 형성되지 않았으나 다른 방향에서는 피막층이 형성되었으며 용융물과 피막층 사이에는 얇은 간극(gap)이 형성된 것을 알 수 있다. 서쪽 방향을 제외한 거의 모든 방향의 내부 shroud는 용탈되었으며 북서의 2.5 cm 길이와 남동의 1.8 cm 길이의 외부 shroud 물질은 용융물과 열적, 화학적 반응을 하였다.

FPT0 실험에서 최종적으로 형성된 용융 pool의 최상부인 25.0 cm 높이에서는 유로가 형성되었던 서쪽을 제외한 거의 모든 핵연료다발 영역이 다공성을 가진 용융된 핵연료다발 물질이 존재하였다. 서쪽을 제외한 거의 모든 방향의 내부 shroud는 용탈되었으며 북서 방향의 3.5 cm 길이와 남동 방향의 2.0 cm 길이의 외부 shroud 물질은 용융물과 열적, 화학적 반응을 하였다. FPT0 실험에서 약 15,000초부터 18,000초까지 형성되었던 용융 pool의 중하부인 26.8 cm 높이에서는 피막층에 포함된 양을 제외하고는 거의 핵연료 다발 물질이 존재하지 않았으며 유로가 형성되었던 남서쪽에는 내부, 남서쪽을 제외한 거의 모든 영역에서는 외곽에 피막층이 형성되었다. 남서 방향을 제외한 거의 모든 방향의 내부 shroud는 용탈되었으며 남서 방향과 북동 방향을 제외한 거의 모든 외부 shroud 물질이 용융물과 열적, 화학적 반응을 하였다.

FPTO 실험에서 약 15,000초부터 18,000초까지 형성되었던 용융 pool의 증상부이며 shroud 물질이 가장 많이 손상된 28.7 cm 높이에서는 피막층을 제외하고는 거의 핵연료 다발 물질이 존재하지 않았으며 유로가 형성되었던 남서쪽의 내부와 남서 방향을 제외한 거의 모든 영역의 외곽에 피막층이 형성되었다. 남서쪽의 외곽에는 유로 때문에 피막층이 형성되지 않았으나 동쪽 방향의 외곽에는 0.5 cm 두께의 피막층이, 북쪽 방향 외곽에는 0.6 cm 두께의 피막층이, 남쪽방향 외곽에는 0.5 cm 두께의 피막층이 형성되었다. 남서쪽 방향을 제외한 거의 모든 방향의 내부 shroud는 용발되었으며 남서 방향과 북동 방향을 제외한 거의 모든 외부 shroud 물질이 용융물과 열적, 화학적 반응을 하였다.

FPTO 핵연료다발의 하부에서 28.7 cm 높이의 북서 방향 외곽에 약 7 cm 두께로 형성되었던 피막층에 대한 EPMA를 수행한 결과인 그림 4에서 보는 바와 같이 피막층 성분은 U가 59 w%, Zr이 21 w%, O가 20 w%로 각각 나타났으며, Fe를 제외하고 화학적 반응 흔적이 나타나지 않았다. FPTO 핵연료다발 하부에서 23.6 cm 높이에 대한 metallographies 분석 결과 중앙 부분에 형성되었던 용융물은 용융 물질인 UO_2 와 ZrO_2 등이 균일하게 섞였으며 많은 다공성을 가진 것으로 나타났다. 또한 용융물 외곽의 피막층 성분은 U가 59 w%, Zr이 21 w%, O가 20 w%로 각각 나타났다.

FPTO 핵연료다발의 상부인 94 cm 높이에 대한 파괴 PIE를 수행한 결과 제어봉의 피복재 물질인 AISI 347(stainless steel) 구성성분인 철, 니켈, 크롬, 산화철 등과 핵연료, 질칼로리 물질의 eutectic 형성을 확인할 수 있었다. 이들 금속들의 eutectic 형성은 핵연료다발 물질들이 원래 용융온도보다 빨리 용융하는 촉매 역할을 하였으며, FPTO 과도상태 실험에서 예상보다 핵연료가 심하게 용융되게 하는 한 인자로 작용하였다. 또한 FPTO 핵연료다발 내에서 제어봉이 중앙에 위치하고 있었기 때문에 핵연료다발 중앙 부분이 외곽보다 더 심하게 손상된 한 요인으로 작용하였다. 그러나 이와 같이 중요하고 복잡한 핵연료다발 물질들 간의 eutectic 형성 현상은 기존 중대사고 해석 전산코드에 잘 모델되어 있지 않아 모델개선이 요구된다.

5. 결론

PHEBUS FPTO 실험의 핵연료 다발에 대한 비파괴 PIE와 파괴 PIE 결과를 통하여 노심손상 후기과정을 정밀 분석하였다. 그 결과, PHEBUS-FPTO 실험에서는 기존에 수행된 어떤 다른 노내 실험의 핵연료다발보다 많이 용융되었으며 용융 pool 및 피막층 형성, 용융물 내부 자연대류 열전달 및 이로 인한 shroud 물질 손상, 핵연료다발 물질들간의 eutectic 형성 등을 보여주었다. 특히 Ag-In-Cd 제어봉 물질과 stainless-steel이 핵연료봉 물질과 반응하여 이들의 용융온도를 낮게하여 실험 예측값보다 많이 핵연료다발이 손상되어 기존 중대사고 해석 전산코드의 개선이 요구되었다. 이 실험의 과도상태중 용융물의 재배치에는 spacer grid가 많은 영향을 미쳤다. 즉, 용융pool은 grid spacer의 상부에 오랫동안 형성되어 자연대류 열전달로 이 지점 상부의 shroud 물질이 많이 손상되었다. 따라서 용융물의 재배치 및 용융 pool의 형성에는 spacer grid가 많은 영향을 미쳐 이에 대한 많은 연구가 요망된다.

참고문헌

1. P. v. der Hardt et al., "The PHEBUS Fission Product Project," J. of Nuclear Materials 188, 1992
2. USNRC, "PBF Severe Fuel Damage Test 1-3 Test Results Report," NUREG/CR-5354, INEL, Oct. 1989
3. C. Gonnier, G. Repetto, and R. Geoffroy, "PHEBUS Severe Fuel Damage Program - Main Experimental

Result and Instrumentation Behaviour, The PHEBUS Fission Product Project," Elsevier Applied Science, London and New York, ISBN1 85166 765 2, 1992

4. F. E. Panisko, "NRU FLHT CB Program Status and Plans," PNL, April 1986
5. USNRC, "Damaged Fuel Experiment DF-1," NUREG/CR-4668, SAND 86-1030, Jan 1990
6. D. Osetek, "Overview of the OECD LOFT FL-2 Test," Presented at the SFD/ST Research Program Review Meeting, Idaho Falls, Idaho, April 10-14, 1989
7. PHEBUS PF FPT0 Test Preliminary Report, May 6 1994 . Compilation of Figures . Addenda
8. P. v. der Hardt, "PHEBUS FP: Fourth Meeting of the PIE Group, Karlsruhe, October 20, 1995," November 10, 1995
9. Cordron, "Proceedings of Seminar on Post-Test Analysis(PTA), Chateau de Cadarache, February 7-8, 1996," TG 304, March 1996

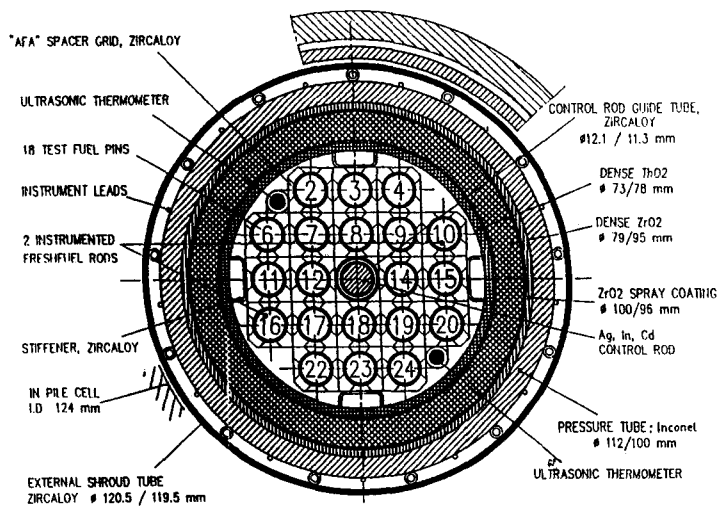


그림 1. PHEBUS FPT 1 핵연료다발의 수평 단면도

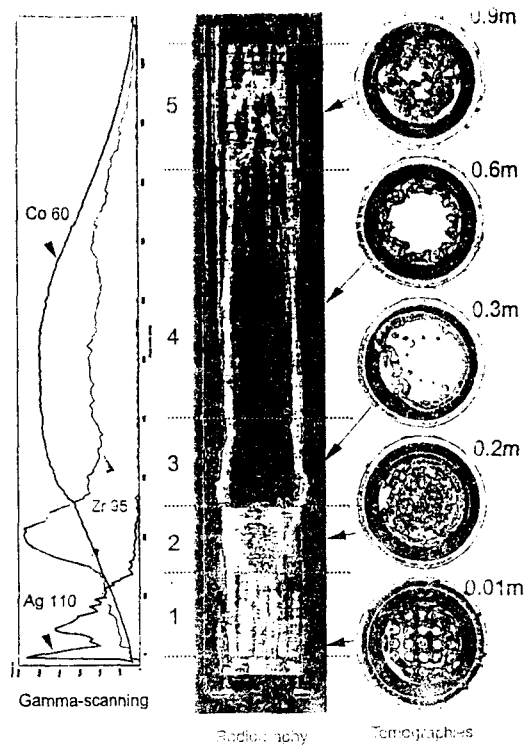


그림 2. PHEBUS FPT0 핵연료다발의 비파괴 PIE 결과

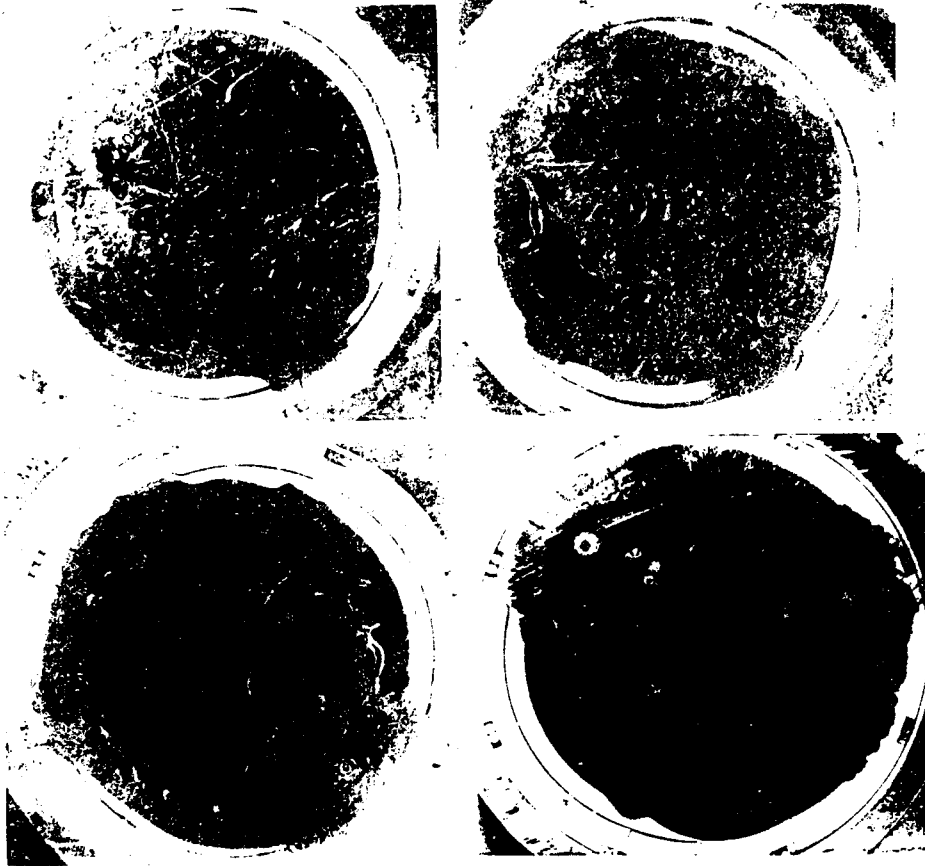


그림 3. PHEBUS FPT0 핵연료다발에 대한 수평단면 사진(23.4 cm, 25.0 cm, 26.8 cm, 28.7 cm)

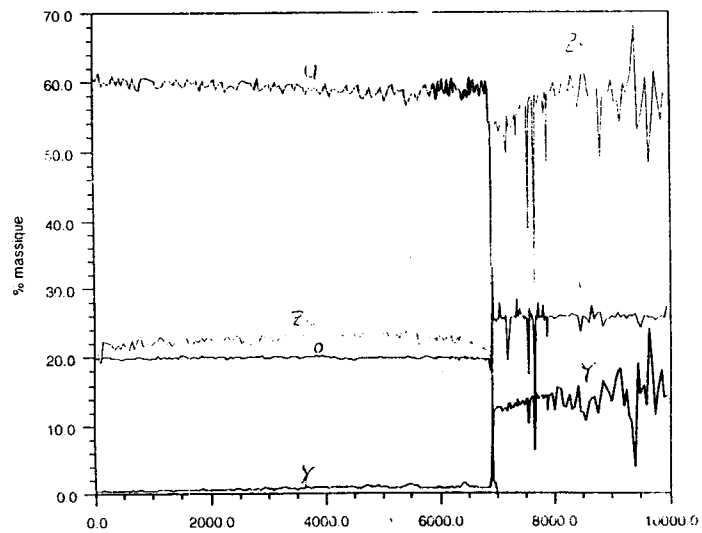


그림 4. 28.7 cm 높이의 PHEBUS FPT0 핵연료다발에 EPMA 결과