

개선형 영구수조밀봉체의 개발

Development of Improved Reactor Cavity Permanent Pool Seal Assembly

김민규, 맹철수, 김범식, 황정기, 김인용

한국전력기술(주)
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

재장전 수조밀봉체는 정상운전시에는 원자로 격납용기내 보관위치에 있다가 핵연료 재장전 작업시 재장전 수조에 재장전수를 요구되는 위치까지 채울 수 있도록, 원자로용기 플랜지와 재장전 수조 바닥 사이의 공동을 막기 위하여 설치되는 환형 구조물이다. 기존의 한국표준형원전에 적용된 수조밀봉체는 고무 밀봉체를 이용한 것으로 착탈에 따른 이동, 설치 및 제거시간이 길어서 발전소 이용률이 감소되고 설치 작업자에 대한 방사선 피폭량이 과다하다는 문제점이 있다. 따라서 차세대 원전에서는 원자로 가동 중에도 재장전 수조밀봉체를 지속적으로 설치해 놓을 수 있는 영구수조밀봉체를 개발하였다. 하지만 개발된 영구수조밀봉체를 한국표준형원전에 적용할 경우 주변 구조물과 간섭이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 간섭문제를 해결할 수 있는 개선형 영구수조밀봉체의 설계와 성능을 제시하였다.

Abstract

The function of the reactor cavity pool seal assembly is to seal the annulus between the reactor vessel flange and refueling pool floor so the water level can be raised as required during the refueling procedure. The installation and removal procedure of the pool seal assembly, which is applied to the KSNP, becomes a critical path of the refueling procedure and causes high radiation exposure to operating personnel. Therefore, a permanent pool seal assembly is developed for the KNGR to be installed permanently during the reactor operation. But, interferences are found when the permanent pool seal assembly for the KNGR is applied to the KSNP. In this paper, an improved permanent pool seal assembly design with the resolution to the interference problems and the result of performance verification by computational analyses are presented.

1.0 서 론

재장전 수조밀봉체는 비핵안전등급 및 비내진등급에 해당되는 기기로서, 핵연료 재장전 작업시 재장전 수조에 재장전수를 요구되는 위치까지 채울 수 있도록, 원자로용기 플랜지와 재장전 수조 바닥 사이의 공동을 막기 위하여 설치되는 구조물이다. 기존의 한국표준형원전

수조밀봉체는 미국 웨스팅하우스(WEC)의 설계를 기초로 설계되었다. 그림 1과 같은 형상을 가진 이 수조밀봉체는 고무 밀봉재로 재장전 수조의 공동을 밀봉한다. 그런데 이 수조밀봉체는 핵연료 재장전시마다 이송, 설치, 해체, 재이송을 반복해야 하고, 이송시에는 원자로 건물 천정 크레인이 사용되어야 한다. 따라서 이동, 설치 및 제거시간이 길어서 발전소 이용률이 감소되고 설치 작업자에 대한 방사선 피폭량이 과다하다는 문제점이 있으며, 설치시에 원자로 상부구조물을 통과해야 하므로 상부구조물의 손상 가능성이 있다. 최근에 공동을 통과하는 원자로 냉각재 주배관에 과단전 누설(leak before break) 개념이 적용됨으로써 주배관의 파단에 의한 공동에서의 국부적인 압력 상승 가능성이 배제됨에 따라 원자로 가동중에도 재장전 수조밀봉체를 지속적으로 설치해 놓을 수 있게 되었다. 따라서 재장전시마다 임시적으로 수조밀봉체를 설치하거나 제거하지 않고 영구적으로 설치할 수 있게 개발한 것이 영구수조밀봉체(reactor cavity permanent pool seal assembly)이다. 국내의 경우 여러 가지 장점으로 인해 차세대 원자로에 적용하기 위한 영구수조밀봉체가 개발되었다[1].

본 논문에서는 차세대 원자로에 적용된 영구수조밀봉체의 구조적 특성을 검토하고, 차세대 원자로에 적용된 영구수조밀봉체를 한국표준형원전에 적용할 수 있는 개선안을 제안하고, 구조해석을 통해 성능을 입증하기로 한다.

2.0 차세대 원자로 영구수조밀봉체의 구조 특성

원자로 가동중에도 재장전 수조밀봉체를 계속 설치해 놓을 수 있도록 영구 수조밀봉체로 설계되었다. 그림 2는 차세대 원자로 영구수조밀봉체의 형상을 보여주고 있다. 이 밀봉체는 기존 한국표준형원전에서 사용하는 고무 밀봉재가 필요하지 않으며, L형 유연판으로 원자로의 열하중 및 지진하중을 흡수하도록 되어 있고, 유연판 상부에 유연판을 보호하기 위한 밀봉판이 설계되어 있다. 구성 부품은 밀봉판(seal plate), 유연판(flexible plate), 지지대(support), 작업통로(access hole)와 덮개(cover)로 이루어진다. 이 밀봉체를 설치할 때는 지지대에 밀봉판의 수평을 유지한 후, 유연판은 원자로 seal ledge 및 건물 보강판에 용접, 부착한다. 따라서 원자로 가동중이나 핵연료 재장전시에도 설치되어 있기 때문에 핵연료 재장전시 탈착할 필요가 없다. 발전소 정상운전시에는 작업통로의 덮개가 제거되어 냉각 공기용 통로로 사용되고 재장전 기간 중에는 덮개가 설치되어 밀봉을 하게 된다. 작업통로 덮개에는 O-링이 설치되어 밀봉을 하게 되며 설치 때마다 누설 여부를 평가하기 위한 검사가 수행된다.

3.0 영구수조밀봉체의 설계 개선

차세대 원자로에 적용된 영구수조밀봉체의 설계 개념을 이용하여 한국표준형원전에 적용할 예정이다. 하지만 이 영구수조밀봉체를 한국표준형원전에 적용할 경우 구조적 특성상 주변 구조물과 간섭이 발생한다. 즉, 그림 3에서 보는 바와 같이 원자로 주위에 방사선 모양으로 4쌍이 설치된 노외계측기 및 상부중성차 차폐벽에 설치된 두 개의 콘크리트 플러그를 설치하거나 제거할 경우 영구수조밀봉체와 간섭이 발생한다. 따라서 이러한 문제점을 해결할 수 있는 개선형 영구수조밀봉체를 개발할 필요가 있다.

3.1 구조 설계 개선

개선형 영구수조밀봉체의 주요 설계 항목은 다음과 같다.

- 1) 유연판 단면 설계
원자로 열팽창에 의한 반경 방향 변위와 지진에 의한 횡방향 변위를 효과적으로 흡수할 수 있는 유연판 설계
- 2) 보수 및 냉각공기용 통로 설계
밀봉판 상부에 보수 그리고 냉각 공기용 통로로 사용될 수 있는 작업통로 제공
- 3) 콘크리트 플러그의 취급용 통로 설계
밀봉판 상부에 콘크리트 플러그의 취급용 통로를 제공
- 4) 지지대 설계
영구수조밀봉체의 설치시 수평을 조절할 수 있는 지지대 제공

위의 개선형 영구수조밀봉체에 대한 주요 설계 항목은 다음과 같은 주변 구조물과의 연계사항을 고려하여 설계되었다.

- 1) 원자로 플랜지에 밀봉체의 설치공간 확보
- 2) 재장전기(refueling machine)의 운전시 간섭 배제
- 3) 노외계측기의 취급시 간섭 배제
- 4) 다중 스팀터드 신장기의 운전 공간 확보(MST 적용시)
- 5) 콘크리트 플러그 취급시 간섭 배제
- 6) 격납건물의 해치를 통해 밀봉체의 반입이 가능한 설계

위에서 제시된 설계 항목과 연계사항이 고려된 개선형 영구수조밀봉체의 형상이 그림 4에 제시되어 있다. 주요 설계 변경 항목은 유연판을 한 개에서 두 개로 증가시켜 외부 하중을 보다 효과적으로 흡수할 수 있게 하고, 유연판의 길이 변경을 통해 노외계측기를 취급할 경우 간섭이 발생되지 않도록 설계한 것이다. 또한 밀봉판에는 상부 중성자 차폐벽에 설치된 콘크리트 플러그의 취급을 위해 통로를 제공하였다. 이 통로는 발전소 건설 기간 중 콘크리트 플러그가 상부 중성자 차폐벽에 안착되고 더 이상 이동시킬 필요가 없을 때, 덮개를 설치하고 밀봉 용접(seal-welding)을 한다. 향후 필요에 따라서 밀봉 용접부를 제거하여 덮개를 들어낸 후 통로를 이용할 수 있다. 한국표준형원전에 차세대 원전 영구수조밀봉체와 설계 변경된 개선형 영구수조밀봉체를 적용할 경우 발생하는 간섭사항에 대한 비교가 표 1에 제시되어 있다.

3.2 구조 해석에 의한 검증

개선형 영구수조밀봉체는 원자로 seal ledge 및 건물 보강판에 용접되어 있으므로 재장전시 수압 및 지진하중을 받고, 재장전 이후 원자로 정상 운전중에도 원자로의 운전 모드에

따른 정적하중(원자로 열팽창, 원자로 변위) 및 열적하중과 지진하중을 받게된다. 개선형 영구수조밀봉체는 비내진등급으로 분류되지만, 안전정지지진(SSE)이 발생했을 때 밀봉체의 파손에 의한 재장전수의 누수 여부를 평가하기 위해, 본 논문에서는 지진하중을 고려하여 탄소성 해석을 수행하였다. 또한 발전소 40년 수명기간동안 개선형 영구수조밀봉체의 건전성을 평가하기 위해 운전기준지진(OBE)을 포함한 피로해석을 수행하였다.

1) 탄소성 해석

영구수조밀봉체의 응력을 계산하기 위하여 범용 구조해석용 프로그램인 ANSYS 5.5[2]를 이용하여 탄소성 해석을 수행하였다. 모델 작성시 3차원 plastic shell 요소(shell 47)를 이용하였고 그림 5에서와 같이 모델의 대칭성을 이용하여 실제 형상을 반으로 자른 형태로 모델하였다. 영구수조밀봉체의 모든 재질은 304 스텐레스로 이루어져 있다고 가정하였다.

해석 결과 원자로의 운전 모드 중 재장전수가 있는 상태에서 안전정지지진이 발생 할 경우 영구수조밀봉체에 최대 응력이 발생하였고, 이때의 등가 응력(equivalent stress)이 34.9 ksi로서 재료의 인장강도인 70 ksi 이내에 있는 것으로 나타났다. 따라서 영구수조밀봉체의 파손은 없는 것으로 평가할 수 있으며 약 50 %의 인장강도에 대한 설계마진을 가지고 있다. 표 2는 재장전수가 있는 경우의 해석 결과를 보여주고 있다. 그림 6은 최대 응력 발생 부위를 보여주고 있는데 원자로 seal ledge에 설치된 유연판의 중앙 부분에서 최대 응력이 발생하였다.

2) 피로 해석

개선형 영구수조밀봉체는 발전소 수명기간 동안 반복적으로 작용하는 하중에 대해 건전성이 확보되어야 한다. 작용하는 하중의 종류와 반복 횟수는 아래와 같다.

- 정상운전 하중 (자중 + 원자로 열팽창) : 500 회
- 운전기준지진 (자중 + OBE) : 200 회
- 핵연료 재장전시 하중 (자중 + 수압) : 40 회

상기 반복하중에 대한 피로 해석 결과 누적 허용계수가 0.81이며, 허용 기준치인 1.0보다 작으므로 허용기준[4]을 만족시킨다.

4.0 결 론

- 1) 차세대 원자로에 적용된 영구수조밀봉체의 설계 개념을 한국표준형원전에 적용하기 위해 노외계측기 및 콘크리트 플러그 취급시 간섭이 발생하지 않는 개선형 영구수조밀봉체를 개발하였다.
- 2) 개선형 영구수조밀봉체에 대한 구조 해석을 수행하였고, 해석 결과 원자로의 운전 모드 중 재장전수가 있는 상태에서 안전정지지진이 발생할 경우 영구수조밀봉체에 최대 응력

이 발생하였다. 하지만 영구구조밀봉체의 파손은 없는 것으로 평가되었으므로, 안전정지 지진이 발생하여도 재장전수의 누수는 발생하지 않는다.

- 3) 원자로 운전중 건전성 평가를 위해 피로 해석을 수행하였고, 해석 결과 허용치를 만족시키고 있다. 따라서 개선형 영구구조밀봉체는 발전소 40년 수명기간 중 반복 운전에 대한 건전성을 확보하는 것으로 평가된다.

참 고 문 헌

- [1] Min-Gyu Kim, In-Yong Kim, Beom-Shig Kim, "Development of Premanent Reactor Cavity Pool Seal Using Optimal Design Technique", Transactions of the 15th International Conference on SMiRT, 1999.
- [2] ANSYS Revision 5.5, "ANSYS User's Manual", ANSYS, Inc., 1999.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, "Materials", American Society of Mechanical Engineers, 1998.
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division I, Subsection NB, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components", American Society of Mechanical Engineers, 1998.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 한수원(주)와 한국전력기술(주)의 한국표준형원전 설계개선 사업 계약에 따라 한수원(주)의 지원하에 수행된 결과입니다.

표 1 차세대원전 영구구조밀봉체와 개선형 영구구조밀봉체 비교

| | 항 목 | 차세대 원전 영구구조밀봉체 | 개선형 영구구조밀봉체 |
|---|-------------|--------------------|--------------------------|
| 1 | 유연관 형상 | L-type의 단면 형상으로 설계 | C-type의 단면 형상으로 설계 |
| 2 | 유연관 갯수 | 1개 (단일 유연관 설계) | 2개 (양단 유연관 설계) |
| 3 | 노외계측기와의 연계 | 간섭이 발생함 | 간섭이 발생하지 않음 |
| 4 | 콘크리트플러그와 연계 | 간섭이 발생함 | 플러그 통로를 설계하여 간섭이 발생하지 않음 |

표 2 탄소성해석 결과

(단위 : ksi)

| 운전조건 | 조합하중 | Stress Intensity | Equivalent Stress | *인장응력강도 |
|--------------------|---------------|------------------|-------------------|------------|
| 재장전 (Refueling) | 자중 + 수압 | 25.0 | 24.8 | 70 @150 °F |
| | 자중 + 수압 + SSE | 40.3 | 34.9 | 70 @150 °F |

* Ultimate Strength according to ASME code Sec. II, Part D[3]

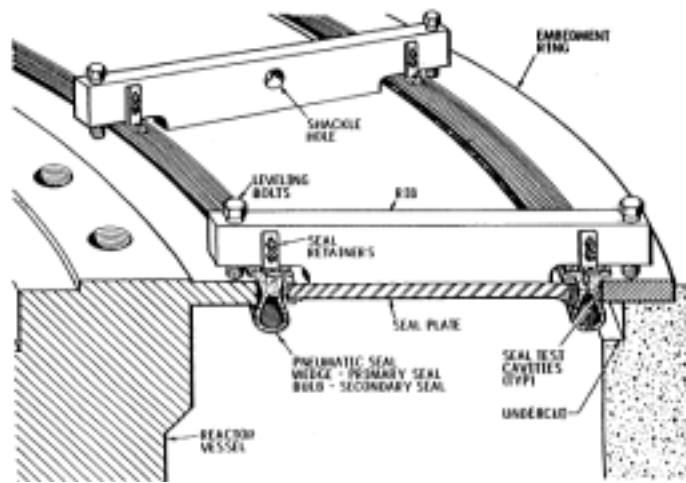


그림 1 한국표준형원전 수조밀봉체

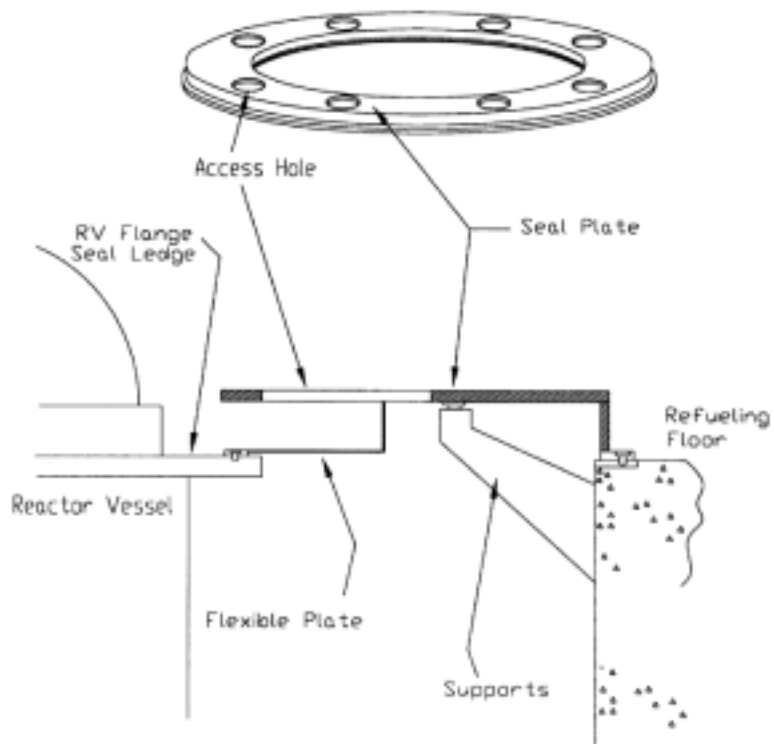


그림 2 차세대 원자로 영구수조밀봉체

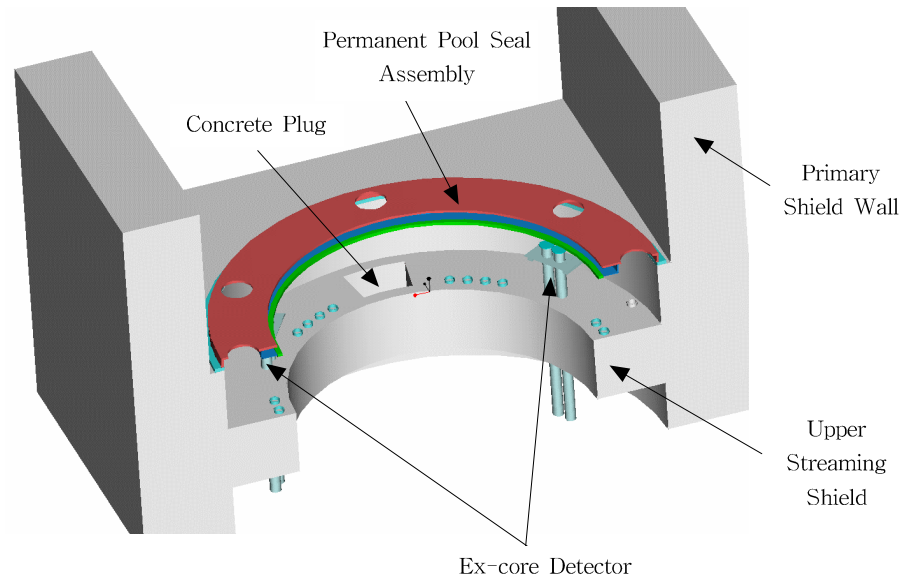


그림 3 노외계측기 및 콘크리트 플러그와의 연계 사항

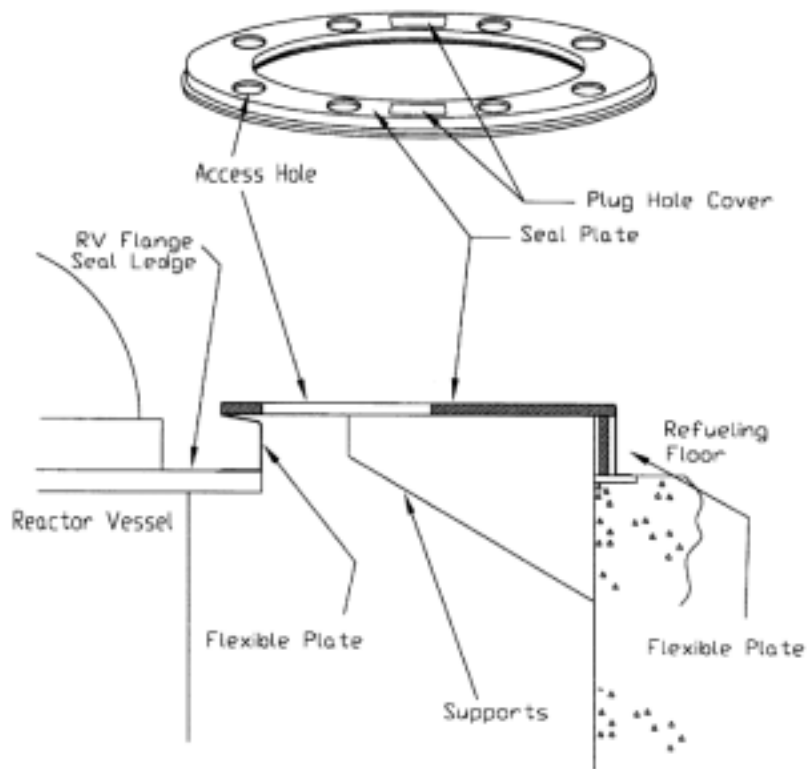


그림 4 개선형 영구수조밀봉체

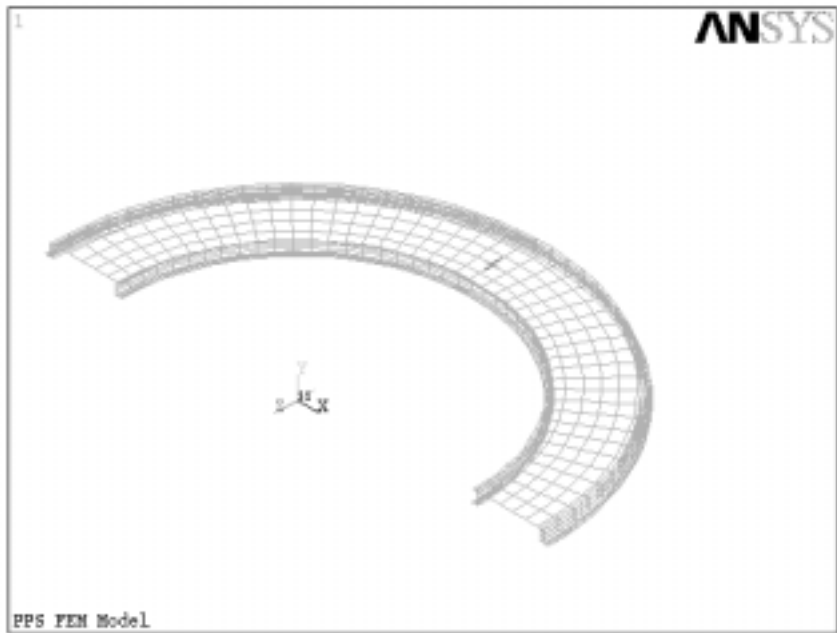


그림 5 개선형 영구수조밀봉체 유한요소 모델

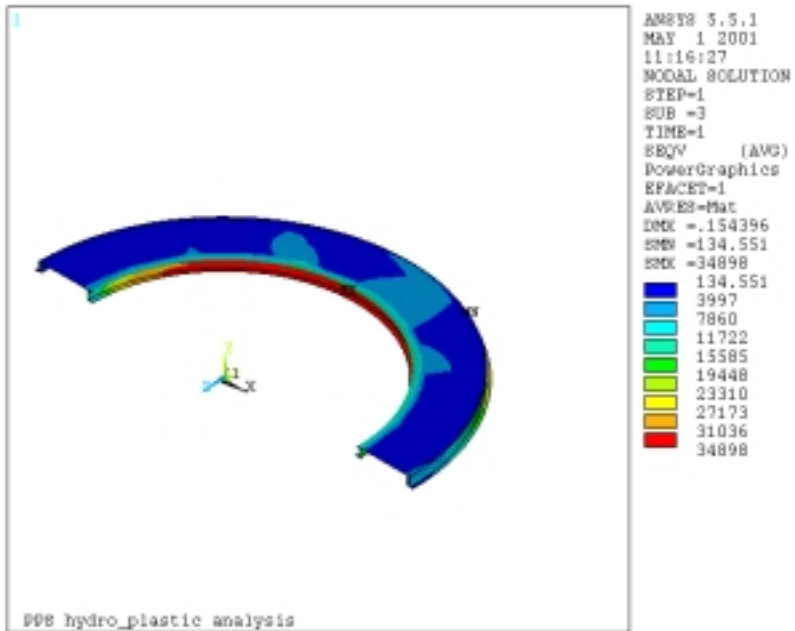


그림 6 개선형 영구수조밀봉체 탄소성 해석 결과 (자중+수압+SSE)