

Structural Safety Analysis of Rear Door in ACP Hotcell Facility for Spent Fuel Treatment

사용후핵연료 차세대관리 종합공정 실증시설내 후면 차폐문의 구조적 안전성 평가

Kie-Chan Kwon, Jeong-Hoe Ku, Eun-Pyo Lee, Won-Myung Choung, Gil-Sung You,
Won-Kyung Lee, Dong-Hak Kuk and Il-Je Cho
Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Deokjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

kiechankwon@kaeri.re.kr

권기찬, 구정희, 이은표, 정원명, 유길성, 이원경, 국동학, 조일제
한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received September 22, 2005 / Approved December 28, 2005)

Abstract

A demonstration facility for an advanced spent fuel conditioning process (ACP) is under construction at KAERI. In this hotcell facility, the rear door is frequently used since all process equipment and materials are taken in and out only through the rear door. Therefore, both the structural safety and stability of the door are essentially required for the safety of ACP facility. In this paper, the finite element analysis has been performed to investigate the structural safety under the impact condition between the rear door and the door frame. Also the possibility of the rear door being tumbled over by the impact force or the inertia force under a sudden stop condition has been evaluated. The analysis results demonstrate that the structural safety and stability of the rear door are sufficiently assured for both the impact and the accidental stop conditions.

Key Words : ACP, hotcell, rear door, structural safety, FEM

요 약

한국원자력연구소에서는 현재 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위한 차세대관리 종합공정의 실증용 핫셀을 건설중에 있다. 이 핫셀에서 모든 물품의 반출입은 후면 차폐문을 통해 이루어 지므로 차폐문의 사용빈도가 매우 크며, 따라서 후면 차폐문의 구조적 안전성 유지가 필수적이

다. 본 논문에서는 핫셀의 후면 차폐문에 대한 구조적 안전성을 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 후면 차폐문을 닫을 때 벽면의 차폐문틀과 충돌하면서 발생하는 구조적 변형에 대한 안전성 평가를 위해 이 상황을 충돌-접촉 문제로 가정하고 동적 해석을 수행하였다. 또한 충돌시 반력에 의한 후면 차폐문의 전도 가능성 및 이동중 갑작스럽게 정지할 경우 관성에 의한 전도 가능성에 대해서도 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 차폐문과 차폐문틀 모두 충돌에 의한 구조적 변형에 대해 충분히 안전함을 확인할 수 있었으며, 여러 사고 조건에 대해서도 후면 차폐문의 전도가 일어나지 않고 안정성을 유지함을 보였다.

중심단어 : ACP, 핫셀, 후면 차폐문, 구조적 안전성, 유한요소법

I. 서론

한국원자력연구소에서 개발중인 사용후핵연료 차세대관리 종합공정(ACP: Advanced spent fuel Conditioning Process)은 고온의 염화리튬 용액속에서 이산화우라늄을 금속우라늄으로 전환하고, 고발열성 핵종인 Cs과 Sr을 효율적으로 제거하여 사용후핵연료의 부피, 발열량 및 방사선 세기를 감소시키고, 처분 용기의 소요량과 처분장의 소요면적을 1/2 이하로 축소시킬 수 있는 방법이다. 이 공정을 실증하기 위해서는 α - γ 형의 핫셀 시설 및 부속시설이 필요하며 연구소는 별도의 실증시설 설치에 따른 고비용을 줄이기 위해 현재 연구소가 보유하고 있는 조사재시험시설(IMEF)의 지하에 위치한 예비 핫셀을 차세대관리 종합공정의 특성 및 용도에 맞추어 설계 변경하여 실증용 핫셀을 건설중에 있다[1].

차세대관리 종합공정 실증시설은 공정셀(process cell)과 유지보수셀(maintenance cell) 두 가지로 구성되며, 각 셀에는 한 개씩의 후면 차폐문(rear door)이 설치된다. 이 시설은 지하에 건설되는 핫셀이기 때문에 각 셀에 천정 차폐문(roof door)이 설치된 일반 핫셀과는 달리 천정 차폐문이 없다. 그러므로 실증시설에서의 모든 물품의 반출입에는 후면 차폐문을 이용할 수밖에 없으므로 후면 차폐문의 사용빈도가 그만큼 높을 것으로 예상된다. 따라서 후면 차폐문에 대한 안전성은 차폐 및 밀봉에 대한 안전성뿐만 아니라 구조적 건전성의 유지가 매우 중요하다.

본 논문에서는 차세대관리 종합공정 실증을 위한

핫셀의 후면 차폐문에 대한 구조적 안전성을 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 기존의 핫셀 후면 차폐문 설계에서 구조 해석을 통한 안전성 평가를 수행한 문헌이 없으며, 본 논문에서는 후면 차폐문 운전의 여러 상황을 고려하여 이에 대한 구체적인 하중조건 및 평가기준을 제시하였다. 그리고 이를 기준으로 동적 해석을 수행하여 안전성 평가를 수행하였다. 안전성 평가는 유지보수셀의 후면 차폐문을 기준으로 하였으며, 동적 해석에 신뢰성을 가지고 있는 구조 해석 코드인 LS-DYNA를 사용하였다[2]. 차폐문이 닫히면서 벽면의 차폐문틀(door frame)과 결속되는 상황을 충돌-접촉 문제로 가정하고 동적 해석을 수행하여 후면 차폐문과 차폐문틀의 구조적 안전성을 평가하였다. 또한 충돌시 차폐문틀의 반력에 의해 후면 차폐문이 전도될 가능성 및 개폐를 위해 후면 차폐문이 이동하다가 갑작스럽게 정지할 경우 관성에 의한 전도 가능성에 대해서도 안정성이 유지되는지를 평가하였다.

II. 유한요소 모델

가. 후면 차폐문의 구조

차세대관리 종합공정 실증용 핫셀의 유지보수셀 후면 차폐문은 철재 빔(beam) 구조물에 구동용 바퀴와 모터 등이 장착되고 외부는 철판 케이스로 이루어져 있으며, 차폐를 보완하기 위하여 일부분에 납 차폐체를 부착하여 차폐 성능을 유지하도록 설계되었다. 그리고 내부의 빈 공간은 중콘크리트를 타설하여

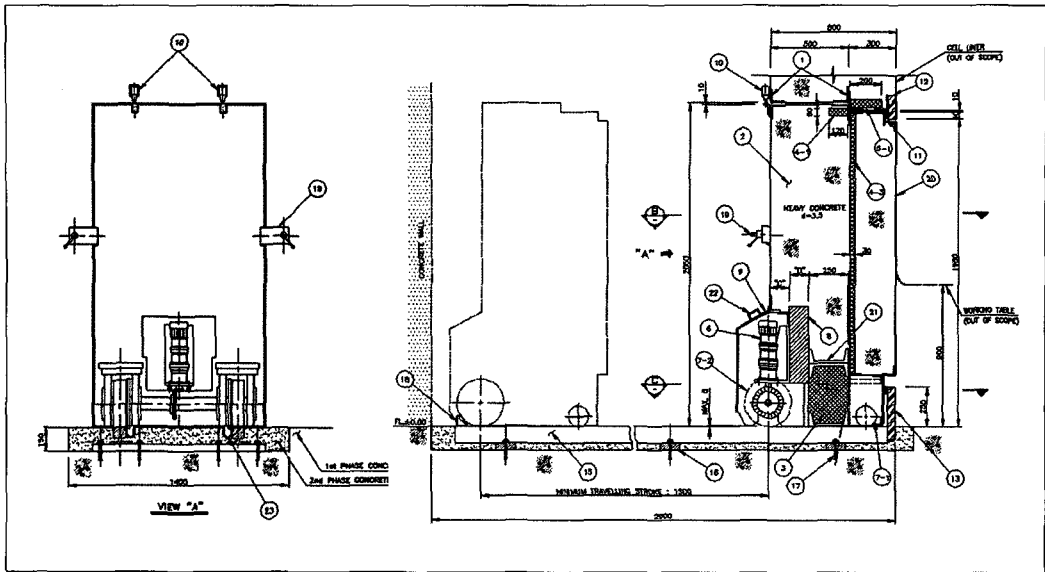


Fig. 1. CAD drawing of the rear door.

채운다. 차폐문은 높이 2,050 mm, 폭 1,100 mm, 두께 1,000 mm 로써 총 중량이 8.5톤에 이른다. 차폐문을 닫을 때 차폐문을 구속하고, 차폐문과 결합되는 차폐문틀은 콘크리트 벽면에 설치된다. 차폐문틀은 60 mm 두께의 플랜지와 앵글 구조물 및 이들을 서로 연결하고, 핫셀 벽면의 콘크리트 거푸집 역할을 하는 철판 구조물로 구성된다. 그리고 바닥에는 사각바 구조물로 레일이 설치되며 이 위에서 후면 차폐문의 이동이 이루어지며, 개폐시 차폐문의 이동속도는 2 m/min (0.033 m/s)로 설정되어 있다. Figs. 1과 2는 후면 차

폐문의 제작 도면과 실제 제작된 후면 차폐문의 모습을 보여준다.

나. 해석 모델

후면 차폐문의 구조적 안전성 평가를 위한 동적 해석에는 구조 해석 코드인 LS-DYNA를 사용하였으며, 차폐문이 전진하여 차폐문틀에 결속되는 경우를 해석하기 위한 유한요소 해석 모델은 Fig. 3과 같다. 여기서는 차폐문과 차폐문틀의 전체적인 유한요소 해석 모델을 보여주고 있으며, 실제 해석에서는 대칭성을 고려하여 1/2 모델만을 사용하였는데, 7,907개의 쉘요소와 31,114개의 솔리드요소로 구성하였으며, 총 절점수는 37,362개이다. Fig. 4는 차폐문의 유



Fig. 2. The rear door in ACP hotcell.

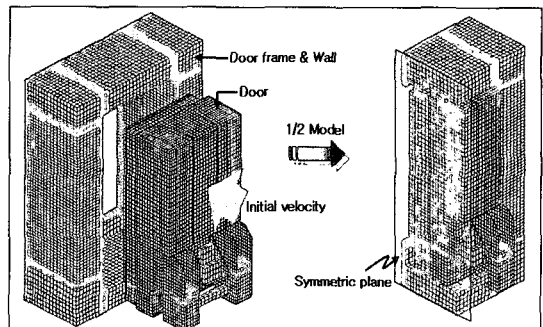


Fig. 3. Finite element model.

한요소 모델을 보여주고 있는데, 외부의 철재 케이스 등은 셸요소로 모델링하였으며, 두께가 두꺼운 철재 구조물, 차폐문들과 접촉하는 고무 가스켓(gasket), 내부의 납 차폐체 그리고 콘크리트 등은 솔리드요소로 모델링하였다. 차폐문에는 5,445개의 셸요소와 15,126개의 솔리드요소를 사용하였다. Fig. 5는 차폐문들과 차폐문들이 설치되는 핫셀 벽의 유한요소 모델을 보여준다. 차폐문들 철관 부분에는 셸요소를 사용하고, 차폐문들의 두꺼운 철관 부분과 납 차폐체 부분에는 솔리드요소를 사용하여 모델링하였다. 그리고 핫셀의 콘크리트 벽은 수평방향으로 차폐문들에서 약 30 cm 떨어진 부분까지 모델에 반영하고 상하부는 바닥과 천장에 붙는 부분까지 모두 포함시켰으며, 솔리드요소를 사용하여 모델링하였다. 실제 콘크리트 벽은 중콘크리트 내부에 철근 구조물이 가로

와 세로 방향으로 매우 촘촘히 삽입되어 있어 콘크리트 자체의 강성보다 훨씬 높은 강성을 갖지만 본 해석에서는 콘크리트만을 모델링하여 실제보다 낮은 강도를 갖는 것으로 가정하였다. 차폐문들과 핫셀 벽 부분의 모델링에는 2,462개의 셸요소와 15,988개의 솔리드요소를 사용하였다.

차폐문의 철재 케이스와 내부의 콘크리트는 서로 단단하게 결합된 상태로 가정하였으며, 차폐문의 바닥면은 수직방향의 변위만 구속하는 미끄러짐 경계조건을 적용하였다. 차폐문들과 콘크리트 벽면 또한 단단하게 결합된 것으로 가정하였다. 모델링에 반영된 핫셀 벽의 수평방향의 끝단과 상하부의 외곽면은 각각 단단한 이웃 벽면과 천장 및 바닥에 고정된 것으로 가정하여 이 부분에서의 모든 변위 자유도를 구속하였다. 그리고 1/2 모델의 전체 대칭

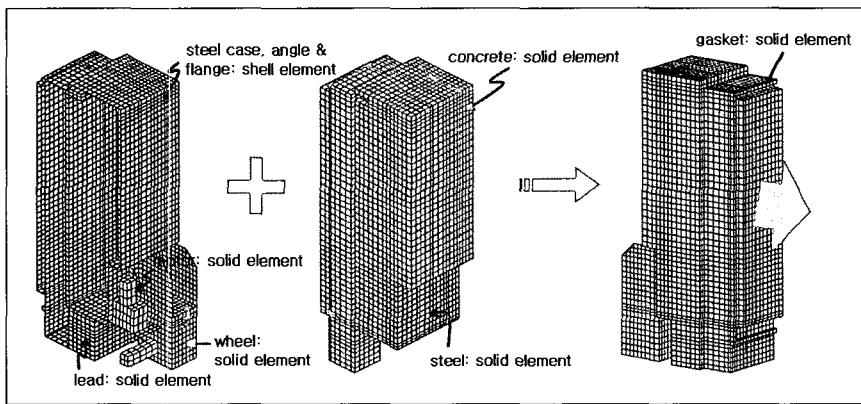


Fig. 4. Detailed view of finite element model for rear door.

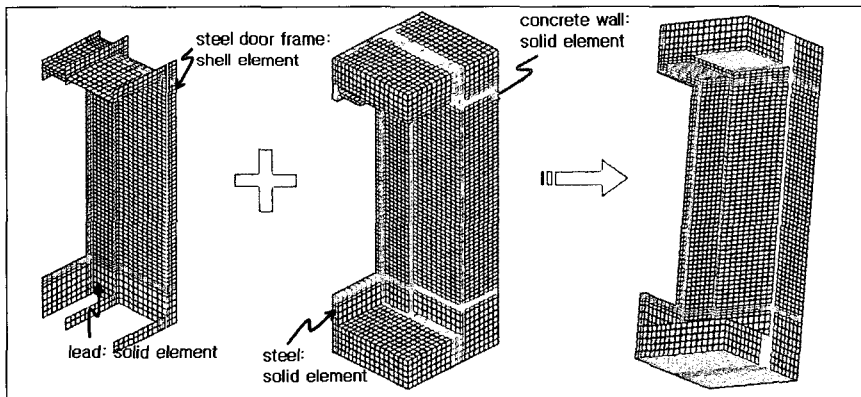


Fig. 5. Detailed view of finite element model for door frame and wall.

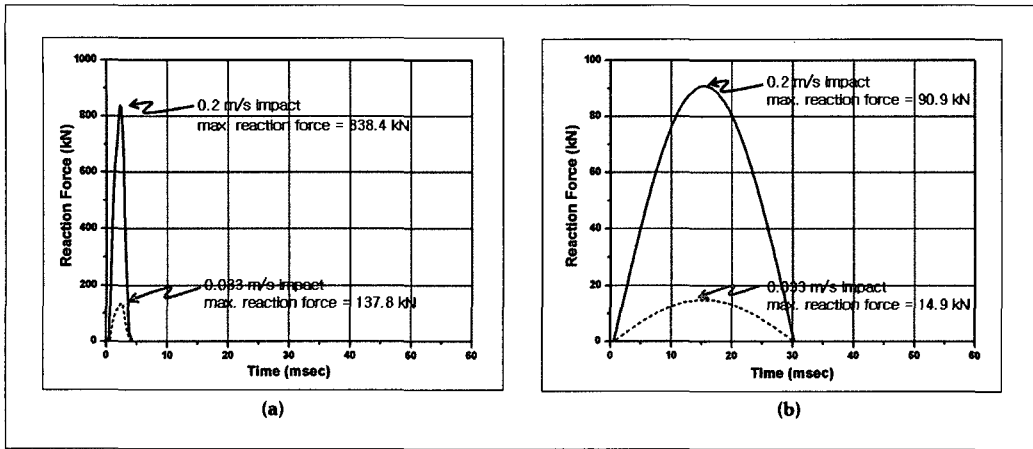


Fig. 6. History of reaction force: (a) without gasket; (b) with rubber gasket.

면에는 대칭 경계조건을 적용하였다. 초기조건으로 는 차폐문의 모든 절점에 일정한 초기속도를 적용 하였다.

해석에서 철재, 납 그리고 중콘크리트 부분은 선형탄성 구성방정식을 가정하였으며, 이들의 재료 물 성치를 Table 1에 수록하였다. 차폐문의 가스켓 부분 을 구성하는 고무 재료를 비압축성 초탄성 (hyperelastic) 재료로 가정하고, Blatz와 Ko가 제안 한 구성방정식을 사용하였다[3]. 이 구성방정식은 LS-

DYNA에 구현되어 있으며, 물성치로는 밀도 1,270 kg/m³, 전단강도 계수(shear modulus) 14.4 MPa를 사용하였다.

III. 해석 결과와 안전성 평가

가. 구조적 변형에 대한 안전성 평가

차폐문이 닫히면서 차폐문틀과 결속되는 상황을 충 돌-접촉 문제로 가정하고 동적 해석을 수행하였다. 실 제 후면 차폐문의 구동속도인 0.033 m/s로 충돌하는 경우와 보수적 평가를 위해 이보다 6배 빠른 0.2 m/s 로 충돌하는 경우를 해석하여 비교하였다. 차폐문에는 고무 가스켓이 부착되어 있으며, 이는 차폐문을 닫 았을 때 핫셀 내부의 밀폐를 위한 것이다. 고무 가스켓 은 강성이 작기 때문에 차폐문틀과 접촉하면서 이 부 분에 큰 압축이 일어나게 되고, 따라서 많은 충돌 에너

Table 1. Material properties for finite element analysis

	Density	Young's modulus	Poisson's ratio
Steel	7,913 kg/m ³	191.1 GPa	0.3
Lead	11,300 kg/m ³	14.34 GPa	0.42
Heavy Concrete	3,500 kg/m ³	12.35 GPa	0.3

Table 2. Finite element results of dynamic analysis

	FE results w/o gasket		FE results w/ rubber gasket	
	Initial velocity		Initial velocity	
	0.033 m/s	0.2 m/s	0.033 m/s	0.2 m/s
Displ. at door frame	0.06 mm	0.34 mm	0.02 mm	0.11 mm
Stress at door frame	5.0 MPa	30.4 MPa	1.7 MPa	10.2 MPa
Stress at door	14.7 MPa	118.7 MPa	13.7 MPa	84.3 MPa
Stress at gasket	n/a	n/a	0.3 MPa	1.5 MPa
Reaction force	137.8 kN	838.4 kN	14.9 kN	90.9 kN

지를 흡수하게 된다. 이는 핫셀 내부의 밀폐 뿐 아니라 차폐문과 차폐문들의 변형을 완화시켜 구조적 안전성에도 크게 기여할 것이다. 이런 영향을 살펴보기 위해 각 충돌속도에 대해 고무 가스켓이 부착되어 있는 경우와 부착되지 않은 경우의 해석을 수행하였다.

해석 결과들로부터 얻어진 차폐문들의 변위 및 응력, 차폐문의 응력, 고무 가스켓의 응력 등의 최대 값들과 그리고 차폐문들의 최대 반력을 Table 2에 수록하였다. 여기서 응력은 von-Mises 응력을 의미한다. 모든 경우에 대해 차폐문들의 최대 변위는 1 mm 미만으로 변위가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 충돌속도를 0.2 m/s로 가정한 경우를 실제 운전 속도인 0.033 m/s로 충돌하는 경우와 비교할 때 변위, 응력, 반력 등이 6배 증가함을 볼 수 있으며, 따라서 이들 값들은 충돌속도에 비례함을 알 수 있다. 응력을 살펴보면 차폐문들 보다는 차폐문에서 큰 응력이 발생하고 있다. 고무 가스켓을 부착한 경우 부착하지 않은 경우에 비해 차폐문들의 변위와 응력은 1/3 정도로 감소하고, 차폐문들의 반력 또한 현저히 감소하였다. 이를 통해 고무 가스켓이 구조적 안전성에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 차폐문에서 발생하는 최대 응력은 상대적으로 적게 감소함을 볼 수 있는데, 충돌속도가 0.033 m/s인 경우 6%, 충돌속도가 0.2 m/s인 경우 29% 감소하였다. 이는 가스켓이 없는 경우 차폐문들의 반력은 중

가하나, 충돌시 접촉면적은 넓어지기 때문이다. 이 경우 차폐문에 가해지는 차폐문들 반력이 국부적으로 작용하지 않고 넓은 접촉면적에 가해져 반력의 증가에 비해 상대적으로 최대 응력값의 증가는 줄어들게 된다.

Fig. 6은 시간의 경과에 따른 차폐문들 반력의 변화를 보여주고 있는데, Fig. 6(a)는 가스켓이 없는 경우이고 Fig. 6(b)는 고무 가스켓이 부착된 경우이다. 고무 가스켓이 부착된 경우 가스켓이 없는 경우에 비해 반력이 11% 수준으로 감소하며, 충돌로 인한 차폐문과 차폐문들의 접촉 시간은 7.5배 증가함을 볼 수 있다. 이는 강성이 작은 고무 가스켓이 천천히 압축 변형을 하면서 많은 에너지를 흡수하기 때문이다. 각 경우에 대해 충돌속도의 영향을 살펴보면, 충돌속도가 6배 증가함에 따라 반력 또한 6배 정도 증가하고 접촉 시간의 변화는 없다.

Fig. 7은 고무 가스켓이 부착되어 있고 0.2 m/s로 충돌하는 경우에 대해 차폐문들의 변위 분포와 차폐문들과 여기에 결합된 벽의 von-Mises 응력 분포를 나타낸다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 최대 변형은 차폐문과 만나는 부분중 아래쪽 중앙에서 일어난다. 최대 변위가 일어나는 부분은 다른 부분에 비해 차폐문들을 지지하는 벽으로부터 상대적으로 멀리 떨어져 있어서 후면 차폐문 진행 방향으로의 구조적 강성이 작다. 그리고 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 최대 응력은

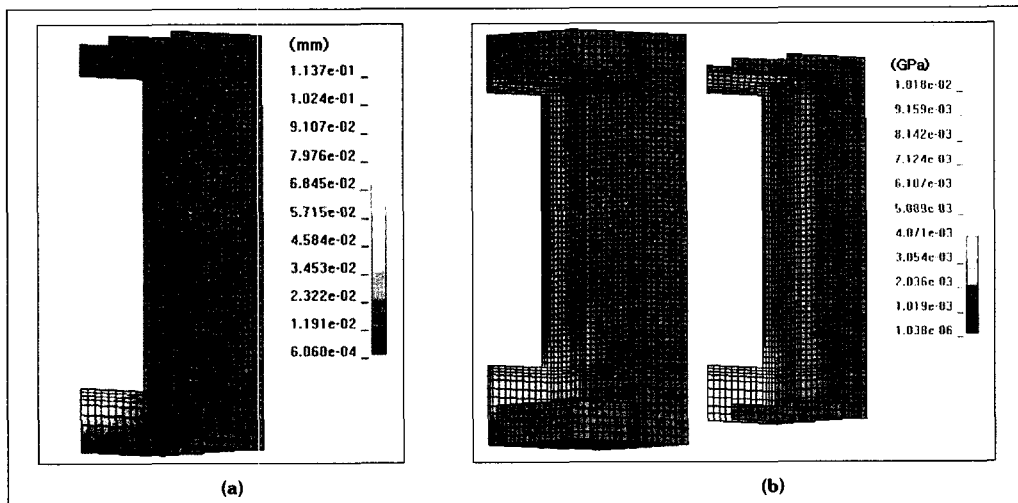


Fig. 7. Displacement and stress distributions of door frame: (a) displacement; (b) von-Mises stress.

아래쪽에 있는 안쪽 모서리 근처에서 발생하며, 최대 응력값은 10.2 MPa로 Table 2에 그것을 수록하였다. 철재의 항복응력인 260 MPa과 비교할 때 차폐문들의 최대응력은 항복응력의 4% 수준으로 구조적으로 충분히 안전함을 알 수 있다. Fig. 8은 차폐문의 변위, 변형률, 응력 분포를 보여준다. 강성이 작은 고무 가스켓에서 최대 변위 및 변형률이 발생함을 볼 수 있다. 그러나 고무의 재료 강성이 작기 때문에 여기서 발생하는 응력값은 크지 않다. 변형 분포를 살펴보면 가스켓이 부착된 철재 판의 아래 부분에서 상대적으로 큰 변형이 발생함을 볼 수 있다. 이 부분의 철재 판 안쪽에는 바퀴가 위치하고 있어서 철재 판과 바퀴 사이에 틈이 존재한다. 따라서 철재 판의 아래 부분은 휨 변형에 대한 강성이 작고 이로 인해 큰 변형이 발생하게 된다. 또한 이 부분에서 최대 응력이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 철재 판의 재료 강성이 고무보다 월등히 크기 때문이다. 여기서의 최대 응력값은 Table 2에서 볼 수 있듯이 84.3 MPa로서 철재에 대한 항복응력의 33 % 정도이므로 차폐문은 탄성 변형만을 하게 되며 또한 구조적으로 안전하다. 이런 평가는 실제 운전속도보다 6배 빠른 경우를 기준으로 한 보수적 평가이며, 실제 운전속도로 충돌하는 경우 차폐문들과 차폐문에서의 최대 응력값들은 각각 항복응력의 1%와 6% 수준으로 구조적 변형이 거의 없다.

나. 전도 가능성에 대한 안정성 평가

차폐문과 차폐문을 충돌시 재료 및 구조적 파손에 대한 평가뿐 아니라 반력에 의한 차폐문의 전도 가능성을 살펴보아야 한다. 충돌시 차폐문에 가해지는 차폐문들의 반력에 의해 회전 모멘트가 발생하게 된다. 이 모멘트의 크기가 차폐문 자중에 의해 발생하는 반대 방향의 회전 모멘트의 크기를 능가하면 차폐문이 기울어지면서 넘어질 가능성이 있다. 이를 해석하기 위해 차폐문의 밑부분과 콘크리트 바닥면을 접촉 조건으로 처리하였고, 충돌후 차폐문 뒷 바퀴 끝부분을 전도에 대한 회전축으로 가정하고 이부분의 절점들이 후진하지 못하도록 제한조건을 주었다. 해석을 수행하면 회전 모멘트에 의해 차폐문이 기울어지면서 앞 바퀴 끝부분이 들려서 콘크리트 바닥면과 떨어지게 된다. 시간이 지남에 따라 반력의 영향이 점차 사라지면 자중에 의해 차폐문은 제자리로 돌아오게 되고 앞 바퀴는 다시 바닥면에 닿게 된다. 이 틈의 최대 크기는 반력이 클수록 증가하며, 반력이 어떤 임계값보다 커져서 차폐문의 질량 중심이 뒷 바퀴의 끝부분을 넘어가게 되면 자중에 의한 모멘트가 반대로 작용하게 되고 차폐문은 계속 기울어져 전도된다. Table 3의 두번째 열은 두 가지 충돌속도 조건에 대해 차폐문 밑면이 콘크리트 바닥면에서 떨어지는 최대 높이를 보여준다. 보수적 조건인 0.2 m/s로 충돌하는 경우 차폐문 밑면이 바닥에서 2.7 mm 들리며, 이는 차폐문이

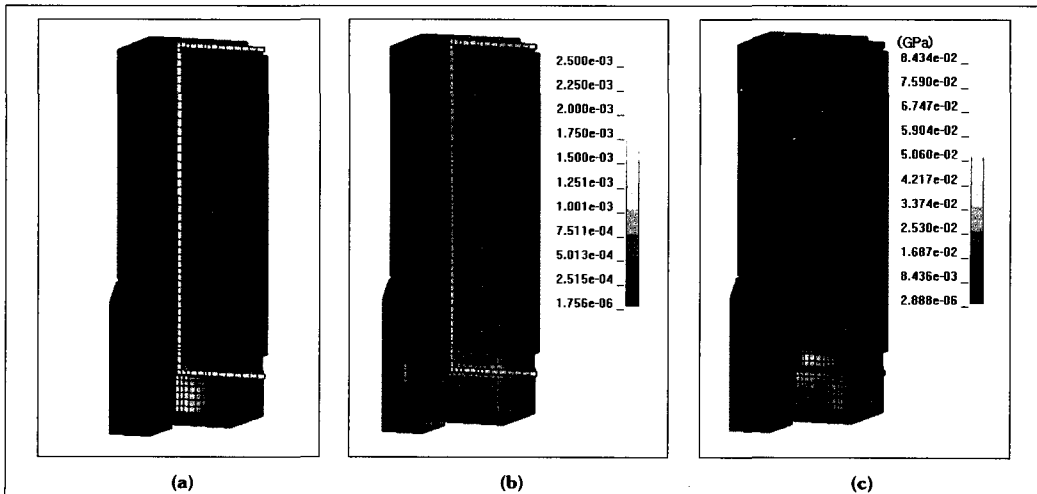


Fig. 8. Displacement, strain and stress distributions of door: (a) displacement; (b) effective strain; (c) von-Mises stress.

최대 0.17° 기울어지는 것에 해당한다. 이후 차폐문은 다시 제자리로 복귀하며, 회전 각도의 크기가 미미한 수준이므로 충돌에 의한 차폐문의 전도 가능성은 없다고 할 수 있다. 질량 중심의 위치를 고려해 기하학적으로 계산해 보면, 실제로 차폐문이 뒤쪽으로 전도되기 위해서는 적어도 20° 이상 기울어져야 한다.

개폐를 위해 후면 차폐문 이동시 취급 부주의 또는 사고에 의해 차폐문이 갑자기 정지하는 일이 발생할 수 있다. 이때 차폐문이 관성에 의해 전도될 가능성이 있으므로 이에 대해서도 해석을 통해 안전성을 평가하였다. 이를 위해 콘크리트 바닥에 돌출된 고정 물체를 가정하고 차폐문의 바퀴부분이 여기에 닿으면 진행하지 못하도록 접촉 제한조건을 주어 해석을 수행하였다. 접촉이 발생하게 되면 관성에 의한 회전 모멘트에 의해 진행 방향 반대쪽 차폐문 밑면이 바닥에서 떨어지게 된다. 이 틈의 최대 높이를 Table 3에 수록하였으며, 세번째 열은 차폐문이 전진하다가 정지하는 경우이고 네번째 열은 후진하다가 정지하는 경우이다. 이동속도가 0.2 m/s인 경우를 기준으로 살펴보면, 전진의 경우 바닥에서 떨어지는 최대 높이가 5.2 mm로서 차폐문이 앞쪽으로 최대 0.32° 기울어졌다가 제자리로 돌아온다. 기하학적 계산에 의하면, 차폐문이 15° 이상 기울어져야 앞쪽으로 전도가 일어난다. 후진의 경우 차폐문 밑면과 콘크리트 바닥면의 최대 간격은 3.0 mm이며, 이때 차폐문은 뒤쪽으로 0.18° 기울어진다. Fig. 9는 차폐문 앞바퀴 끝단과 바닥면과의 간격이 시간에 따라 어떻게 변화하는지 보여준다. 초기에 차폐문이 기울어지다가 관성에 의한 회전 효과가 사라지면 다시 제자리로 돌아오는 것을 볼 수 있다. 양 방향 모두 갑작스런 정지로 인한 차폐문의 기울어짐이 전도가 일어날 임계 각도보다 현저히 작으므로, 본 후면 차폐문은 전도에 대한 구조적

안정성을 충분히 확보하고 있다.

IV. 결론

차세대관리 종합공정 실증을 위한 핫셀의 후면 차폐문에 대한 구조적 안전성을 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 안전성 평가는 유지보수셀 후면 차폐문을 기준으로 하였으며, 보수적 평가를 위해 실제 운전 속도보다 큰 속도를 고려하였다. 먼저 차폐문을 닫을 때 차폐문틀과 충돌하면서 발생하는 구조적 변형에 대한 안전성 평가를 수행하였다. 이때 차폐문틀의 최대 변위는 1 mm 미만으로 거의 발생하지 않는 수준이었다. 차폐문틀과 차폐문 모두 철재 구조물에서 최대 응력이 발생하였고 크기는 각각 항복응력의 4 %와 33 % 수준으로 구조적으로 충분히 안전함을 확인하였으며, 밀폐를 위해 차폐문에 부착한 고무 가스켓이 구조적 안전성에도 크게 기여함을 알 수 있었다. 또한 충돌시 차폐문틀의 반력에 의해 차폐문이 전도될 가능성 및 개폐를 위해 후면 차폐문이 이동하다가 갑작스럽게 정지할 경우 관성에 의한 전도 가능

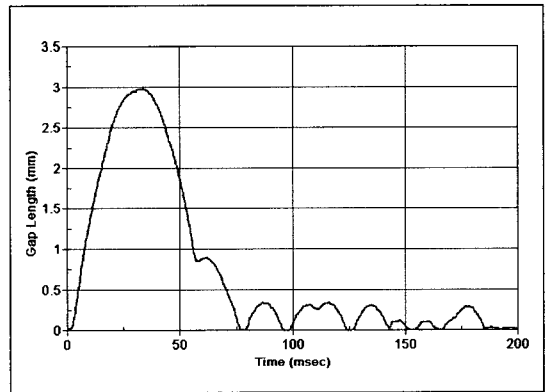


Fig. 9. History of the gap length between the bottom edge of the inclined rear door and ground floor.

Table 3. The maximum gap length between the bottom edge of the inclined rear door and ground floor

Initial velocity	Source of rear door inclination		
	Reaction force of door frame	Sudden stop during forward motion	Sudden stop during backward motion
0.033 m/s	0.1 mm	0.2 mm	0.1 mm
0.2 m/s	2.7 mm	5.2 mm	3.0 mm

성에 대해서도 해석을 수행하였다. 모든 경우에 대해 차폐문이 최대로 기울어졌을 때의 각도가 전도는 일어날 임계 각도의 3% 미만으로 전도가 일어날 가능성은 거의 없으며 충분한 구조적 안정성을 확보하고 있다.

참고문헌

- [1]유길성, 정원명, 구정희, 조일제, 박성원, 이은표, 안상복, 백상열, 이기순. 차세대관리 종합공정 실증시설 설계요건서, 한국원자력연구소 보고서, KAERI/TR-2004/2002 (2002).
- [2]R. Whirley and B. Engelmann, "Automatic contact algorithm in DYNA3D for crashworthiness and impact problems," Nuclear Engineering and Design, 150, pp. 225-233 (1994).
- [3]P.J. Blatz and W.L. Ko, "Application of finite element theory to the deformation of the rubbery materials," Trans. Soc. of Rheology, 6, pp. 223-251 (1962).