

## Structural Safety Analysis of Openable Working Table in ACP Hot Cell for Spent Fuel Treatment

### 사용후핵연료 처리를 위한 ACP 실증시설내 개폐형 작업대의 구조적 안전성 평가

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

[kiechankwon@kaeri.re.kr](mailto:kiechankwon@kaeri.re.kr)

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

(Received August 29, 2005 / Approved November 22, 2005)

#### Abstract

A demonstration facility for advanced spent fuel conditioning process (ACP) is under construction in KAERI. In this hot cell facility, all process equipments and materials are taken in and out only through the rear door. The working table in front of the process rear door is specially designed to be openable for the efficient use of the space. This paper presents the structural safety analysis of the openable working table, for the normal operational load condition and accidental drop condition of heavy object. Both cases are investigated through static and dynamic finite element analyses. The analysis results show that structural safety of the working table is sufficiently assured and the working table is not collapsed even when an object of 500 kg is dropped from the height of 50 cm.

**Key Words** : ACP, hot cell, working table, structural safety, FEM

#### 요 약

한국원자력연구소에서는 현재 사용후핵연료의 효율적인 관리를 위한 차세대관리 종합공정(ACP)의 실증용 핫셀을 건설중에 있다. 본 논문에서는 핫셀 내부의 리어도어(rear door)와 만나는 부분에 설치될 작업대(working table)의 구조적 안전성을 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 이 부분의 작업대는 물품들의 반출입을 위해 개폐식으로 설계되었기 때문에 다른 작업대에 비해

지지 부위가 적으므로 구조적 안전성 평가가 반드시 필요하다. 핫셀을 가동할 때 작업대 위에 공정 장치들을 반입하거나 핫셀 크레인을 사용해 적재하게 되므로, 안전성 평가를 위해 정적 구조 해석과 동적 구조 해석을 함께 수행하였다. 해석 결과를 통해 두 경우 모두에 대해 개폐형 작업대가 구조적으로 충분히 안전함을 확인할 수 있었다. 또한 50 cm 이하 충돌의 경우에도 작업대의 파손이나 붕괴가 일어나지 않고 안전성이 유지되었다.

**중심단어** : ACP, 핫셀, 핫셀 작업대, 구조적 안전성, 유한요소법

## I. 서론

한국원자력연구소에서는 사용후핵연료의 저장 안전성 및 경제성을 확보하기 위하여 사용중인 이산화우라늄을 사용후에는 금속우라늄으로 저장하여 저장 부피와 방사선 세기를 감소시키는 사용후핵연료 차세대관리 종합공정(ACP)을 현재 개발 중이다. 이 공정을 실증하기 위해서는  $\alpha$ - $\gamma$  type의 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 맞도록 설계 변경하여 실증용 핫셀을 건설하고 있다[1].

현재 건설중인 차세대관리 종합공정 실증시설은 지하에 건설되는 핫셀이기 때문에 일반 핫셀과는 달리 루프도어(roof door)가 없다. 따라서 모든 물품의 반출입에는 리어도어(rear door)를 이용할 수밖에 없다. 이를 위해 차세대관리 종합공정 실증시설에서는 리어도어 앞 부분의 작업대(working table)를 개폐가 가능한 구조로 설계하여 물품을 반출입할 때에는 작업대의 일부분을 개방하여 물체를 반입할 수 있도록 하고, 평상시에는 덮어두어 일반 작업대와 마찬가지로 여러 가지 공정장치 또는 물품을 적재 또는 보관할 수 있도록 하여 핫셀 공간의 효율성을 높였다. 작업대는 스테인레스강인 STS304 재료로 설계되었으나, 작업대의 개폐를 위해 중앙 상부의 일부는 STS340 재료를 사용하였으며, 여기에 전자석을 올려 놓고 핫셀 내부의 크레인으로 인양하여 작업대를 들어올릴 수 있도록 하였다.

핫셀의 설계에 있어서 이러한 효율성과 더불어 구

조적 안전성이 매우 중요시 된다. 핫셀의 실제 운전 시 작업대에 여러 공정장치 또는 물품들을 보관하거나 핫셀 내부 크레인을 통해 적재하는 작업이 자주 발생하게 되며, 따라서 이 때의 구조적 안전성이 보장되어야 한다. 본 논문에서는 차세대관리 종합공정 실증을 위한 핫셀의 개폐형 작업대의 구조적 안전성을 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 핫셀의 운전 중에 발생 가능한 최대 하중조건을 고려하여 작업대에 물품들을 보관하는 경우는 정적 해석을 수행하여 안전성을 평가하고, 크레인을 사용해 물품을 적재하는 경우는 동적 해석을 통해 평가한다. 기존의 핫셀 설계에서는 정적인 조건하에서 핫셀 작업대에 작용하는 자중에 대해서만 해석을 수행해 왔으나, 본 논문에서는 구체적인 하중조건을 설정하고 정적 및 동적 해석을 통해 비교 평가한다.

## II. 정적 안전성 평가

본 장에서는 개폐형 작업대 위에 공정장치 또는 물품들을 보관하는 경우의 구조적 안전성을 정적 해석을 통해 평가한다. 이를 위해 범용 유한요소해석 코드인 ABAQUS와 LS-DYNA를 사용해 내연적(implicit) 기법으로 정적 구조 해석을 수행한 후 그 결과를 비교하고 고찰하였다.

### 가. 개폐형 작업대의 구조 및 하중조건

작업대는 핫셀 바닥면에서 900 mm 높이에 설치되며, 이를 위해 작업대를 안착시키고 지지하기 위한 작업대 프레임이 격자형의 튼튼한 구조로 설치되어 있다. 일반 작업대는 작업대 프레임에 용접되어 고정

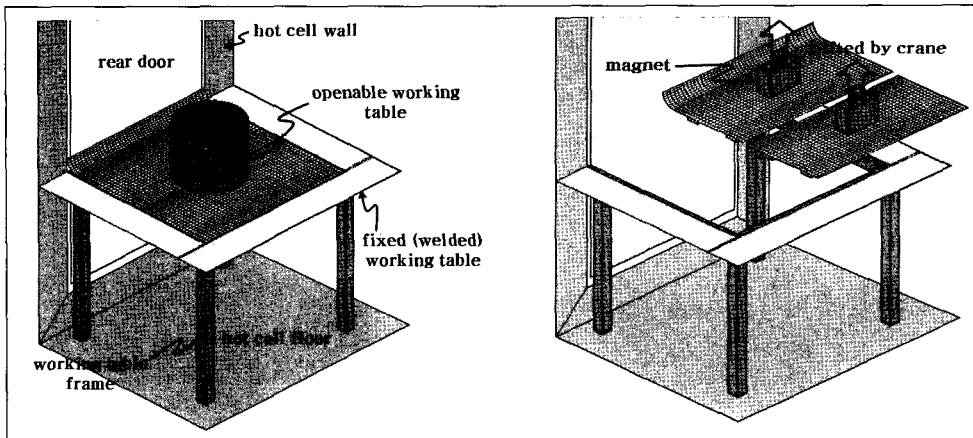


Fig. 1. Schematic drawing of the openable working table in ACP hot cell

되어 있으나, 리어도어 앞에 위치한 개폐형 작업대는 가장자리만 작업대 프레임 위에 단순히 걸쳐져 있다. 개폐형 작업대는 인양시 전자석이 부착되는 중앙 상부의 일부분을 제외하고는 스테인레스강인 STS304의 재료로 이루어졌으며, 길이 982 mm, 폭 930 mm, 두께 6 mm이다. 그러나 폭을 이등분하여 두 개로 나누어 지기 때문에 각각은 길이 982 mm, 폭 465 mm이다. 그리고 하단에는 75×40 mm의 C형강을 두개씩 부착하여 작업대의 굽힘강성(bending stiffness)을 높이도록 하였으며, 리어도어와 만나는 부분은 반경 70 mm의 굴곡이 있도록 설계하였다. Fig. 1은 개폐형 작업대에 물품이 적재된 모습과 작업대의 개폐를 위해 인양되는 모습의 개략도를 보여준다.

핫셀 내부에서 중량물을 운반할 수 있는 핫셀 크레인인 최대 취급용량이 1톤이지만 핫셀 내 공정장치 등의 최대 자중이 200 kg 이하인 점을 고려하여 개폐형 작업대 위에 올려놓을 수 있는 물체의 최대중량을 500 kg으로 설정하고 한쪽 부분에 작용하는 하중은 250 kg<sub>f</sub>로 가정하였다.

### 나. 정적 구조 해석

정적 해석에서는 구조해석코드인 LS-DYNA와 ABAQUS를 사용해 내연적 기법으로 3차원 해석을 수행하고, 해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 두 결과를 비교하였다. 구조적 대칭성을 고려하여 개폐형 작업대의 두 부분중 리어도어와 만나는 부분만을

해석하였으며, 이 부분의 유한요소해석 모델은 Fig. 2와 같다. 모두 3차원 쉘요소로 모델링하였으며, 사용한 총 요소수는 2,384개로 이중 1,680개는 작업대에 704개는 C형강 모델링에 사용되었고 총 절점수는 2,394개이다.

해석에 사용한 STS304의 재료 물성치는 밀도 7,913 kg/m<sup>3</sup>, 탄성계수 191.1 GPa, 항복응력 172.5 MPa, 소성경화계수(strain hardening modulus) 8.358 GPa, 극한강도(ultimate strength) 489.7 MPa이다[2,3]. 재료의 거동을 대해서는 선형탄성 이론과 J<sub>2</sub>-유동법칙(flow rule)에 기초한 탄소성 구성방정식을 사용하였다. 소성 변형에 대한 거동을 표현하는 J<sub>2</sub>-유동법칙은 von-Mises 항복조건에 기초하며, 선

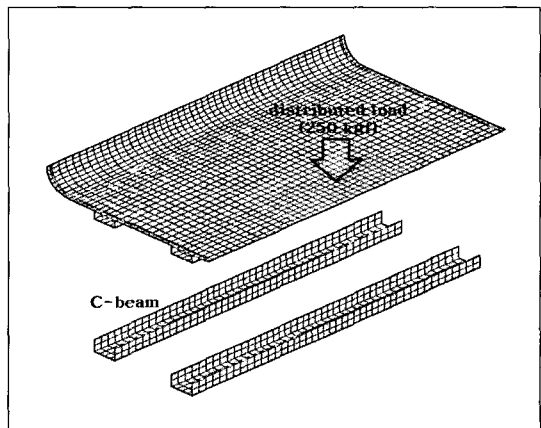


Fig. 2. Finite element model for static analysis

형 등방성 경화(linear isotropic hardening)를 가정하였다. 작업대 위에 물품 보관시의 하중을 고려하기 위해 Fig. 3과 같이 400 mm×200 mm의 면적에 250 kgf에 해당하는 분포하중이 작용하도록 하였다. 작업대의 대칭성을 고려하며 중앙의 대칭면에는 대칭 경계조건을 적용하였다. 그리고 작업대 양 측면은 프레임이 지지하고 있으므로 프레임 모서리의 위치, 즉 작업대의 양 측면에서 11 mm 떨어진 부분에는 수직 방향, 즉 z축 방향의 변위 및 x축 방향의 회전 자유도를 구속하고, 강체 운동을 제거하기 위해 가운데 앞부분의 절점은 y축 방향의 변위 자유도를 구속하였다.

작업대의 자중을 무시한 경우와 고려한 경우를 해석하고, 또한 굽힘강성을 높이기 위해 보강한 C형강의 효과를 살펴보기 위하여 C형강을 보강하지 않은 작업대에 대해서도 해석하였다.

Table 1은 해석 결과들로부터 얻어진 최대 처짐량, 즉 수직방향의 변위와 최대 von-Mises 응력을 보여준다. C형강을 보강하지 않은 작업대의 해석 결과를 C형강을 보강한 경우의 결과와 비교하면, C형강을 보강함에 따라 최대 처짐량은 0.76 mm 에서 0.46 mm로 40% 감소하였으며, 최대 응력은 71.9 MPa 에서 22.9 MPa로 68% 감소하였다. 따라서 보강된 C형강은 구조적 안전성 증가에 크게 기여함을 알 수 있다. 작업대의 자중을 고려한 경우 자중을 무시한 경우보다 최대 처짐량이 0.02 mm 증가하나, 최대 처짐량의 크기와 상대적으로 비교할 때 정적 해석에서 자중의 효과는 미미함을 알 수 있다. 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 두 해석 코드 LS-DYNA와 ABAQUS의

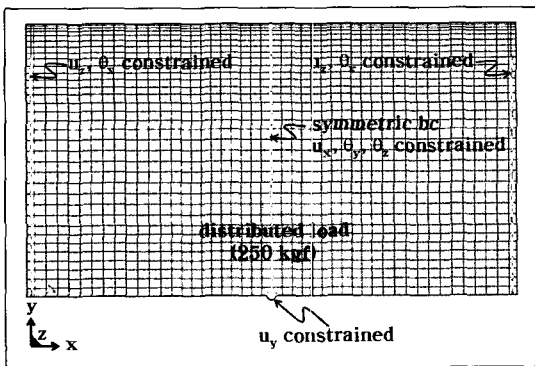


Fig. 3. Boundary conditions for static analysis

결과를 비교하였는데 거의 일치함을 볼 수 있다. 작업대의 자중을 고려한 경우 수직방향의 최대 변위는 0.48 mm이고, 최대 응력은 24.3 MPa이다. 작업대의 두께가 6 mm임을 고려하면, 최대 처짐은 두께의 8%이므로 변형의 양이 매우 적음을 알 수 있다. 정상운전 조건에서는 재료의 변형이 탄성 영역내에 있어야 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있다. 해석에 사용한 구성방정식인  $J_2$ -유동범칙에서는 von-Mises 응력이 항복응력보다 커지면 소성 변형이 발생한다고 가정하므로, 본 논문에서는 재료에서 발생한 최대 von-Mises 응력과 재료 항복응력의 비교를 통해 정상운전 조건에 대한 구조적 안전성을 평가한다. Table 1을 보면 발생한 최대 von-Mises 응력은 24.3 MPa이고, 이는 작업대 재료의 항복응력인 172.5 MPa과 비교할 때 항복응력의 14% 수준이므로 구조적으로 충분히 안전하다고 평가할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 작업대의 수직변위분포와 von-Mises 응력분포를 보여준다. 최대 수직 변위가 작업대의 중앙 앞부분에서 일어나며, 최대 응력은 작업대 아래쪽에 보강한 C형강에서 발생함을 볼 수 있다.

### III. 동적 안전성 평가

본 장에서는 개폐형 작업대 위에 공정장치 또는

Table 1. Finite element results of static analysis

| FE analysis without gravity<br>(Working table without C-beam) |                 |             |
|---|-----------------|-------------|
|   | Max. deflection | Max. stress |
| LS-DYNA   | 0.76 mm         | 71.9 MPa    |
| FE analysis without gravity<br>(Working table with C-beam)    |                 |             |
|   | Max. deflection | Max. stress |
| LS-DYNA   | 0.46 mm         | 22.9 MPa    |
| ABAQUS  | 0.46 mm         | 23.1 MPa    |
| FE analysis with gravity<br>(Working table with C-beam)       |                 |             |
|   | Max. deflection | Max. stress |
| LS-DYNA   | 0.48 mm         | 24.1 MPa    |
| ABAQUS  | 0.48 mm         | 24.3 MPa    |

물품들을 핫셀 크레인으로 적재하는 경우의 구조적 안전성을 평가하기 위해 이 경우를 충돌-접촉 문제로 가정하고 동적 구조 해석을 수행한다. 이를 위해 충돌 문제 해석에 대하여 신뢰성을 확보하고 있는 범용 유한요소해석 코드인 LS-DYNA의 외연적(explicit) 기법을 사용해 동적 해석을 수행하고 그 결과를 고찰하였다[4].

작업대의 유한요소 모델은 Fig. 6에서 보듯이 앞장의 정적 해석의 경우와 같으며, 작업대 위에 물품의 무게에 해당하는 분포하중을 가하는 대신에 이에 상응하는 질량을 가지는 원통형 물체가 낙하하여 작업대 위에 충돌하도록 하였다. 구조적 대칭성에 의해 리어도어와 만나는 부분의 작업대만을 해석하므로 원통형 물체의 1/2을 모델링하였으며, 여기에는 육면체 모양의 3차원 솔리드요소 750개가 사용되었다. 낙하하는 원통형 물체는 직경이 400 mm이며, 밀도는 모델링한 반원통의 질량이 250 kg이 되도록 값을 주

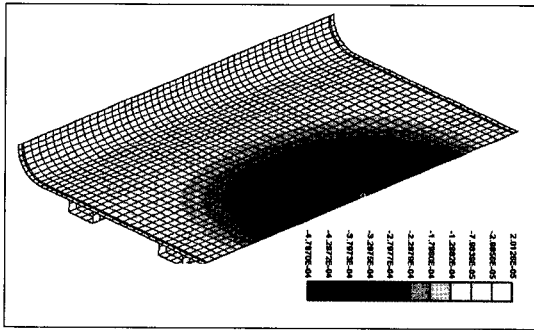


Fig. 4. Deflection contour for static analysis

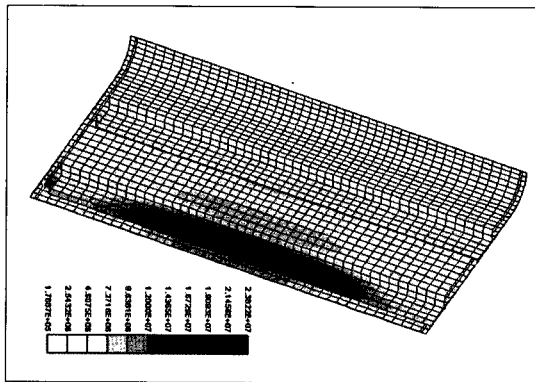


Fig. 5. von-Mises stress contour for static analysis

었다. 이 부분의 탄성계수로는 작업대의 재료인 STS304보다 월등히 큰 값을 가정하여 충돌시 변형의 대부분이 작업대에서 일어나고 원통형 물체는 변형을 거의 하지 않고 강체처럼 거동하도록 하였으며, 대칭면에는 대칭 경계조건을 적용하였다. 그리고 대변형이 발생함을 고려하여 해석시 실제 현상을 보다 정확하게 묘사할 수 있도록 작업대에 변위 경계 조건을 직접 적용하지 않고, 작업대를 지지하는 아래쪽 프레임과 작업대와 만나는 리어도어 부분을 접촉 조건을 가정하여 처리하였다. 모든 접촉에서 마찰은 무시하고 미끄러짐 조건을 적용하였다.

핫셀 크레인의 상하 운동은 고속과 저속의 두 가지 속도로 설정되어 있는데, 저속운전속도는 1 m/min(0.0167 m/s)이고, 고속운전속도는 3.5 m/min(0.0583 m/s)이다. 적재하려는 물품은 크레인의 운전 속도로 작업대와 충돌하게 되며, 보통의 경우 적재 과정에서는 안전을 위해 저속 운전을 하게 된다. 그러나 크레인 운전상의 실수 등으로 인하여 고속으로 충돌하는 경우가 발생할 수 있으므로 본 논문에서는 저속과 고속 두 가지 충돌 속도 모두에 대해 해석을 수행하였다.

크레인을 사용해 물품을 작업대에 적재할 때 저속은 물론 고속의 경우도 정상운전 조건으로 가정한다. 고속으로 적재하는 것은 피하여야 하지만 운전자의 실수로 인하여 가끔 발생할 수 있는 상황이기 때문이다. 따라서 이때의 안전성 평가는 적재시 작업대를 이루는 재료에서 소성 변형이 발생하지 않음을 기준으로 이루어진다. Table 2는 동적 해석 결과들로부터

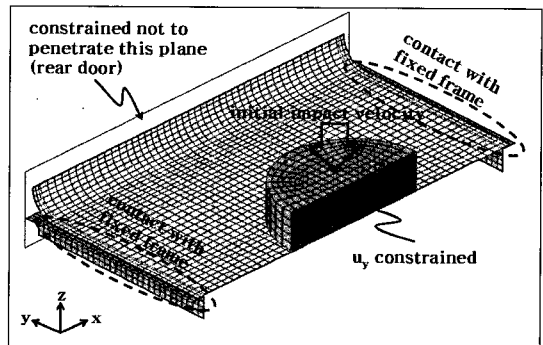


Fig. 6. Finite element model for dynamic analysis

**Table 2. Finite element results of dynamic analysis**

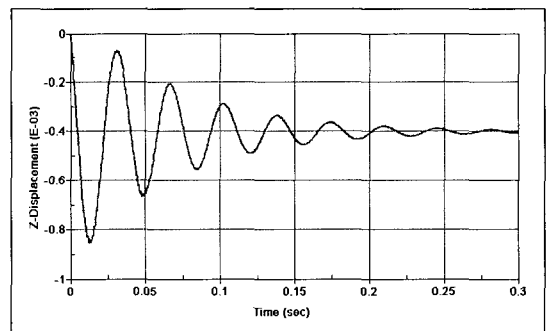
| FE analysis with low loading speed  |                 |             |
|-------------------------------------|-----------------|-------------|
|                                     | Max. deflection | Max. stress |
| w/ gravity                          | 0.82 mm         | 42.9 MPa    |
| w/o gravity                         | 0.12 mm         | 6.2 MPa     |
| FE analysis with high loading speed |                 |             |
|                                     | Max. deflection | Max. stress |
| w/ gravity                          | 0.97 mm         | 50.6 MPa    |
| w/o gravity                         | 0.41 mm         | 21.7 MPa    |
| w/ damping                          | 0.85 mm         | 43.8 MPa    |

언어진 작업대의 최대 처짐량과 최대 von-Mises 응력값을 보여준다. 크레인을 저속으로 운전하면서 물체를 내려놓는 경우 최대 처짐량과 최대 응력은 정적 해석의 경우와 비교할때 1.8배 정도 증가하였다. 이때의 최대 처짐은 작업대 두께의 14%이고, 최대 응력은 항복응력의 25% 수준이므로 구조적으로 충분히 안전하다. 고속으로 내려놓는 경우에도 최대 처짐이 1 mm 미만이며, 발생하는 최대 응력은 항복응력의 30% 정도로써 작업대는 탄성 변형만을 하게 된다. 따라서 크레인으로 물품을 내려놓는 경우 작업대의 구조적 안전성에는 문제가 없음을 알 수 있다.

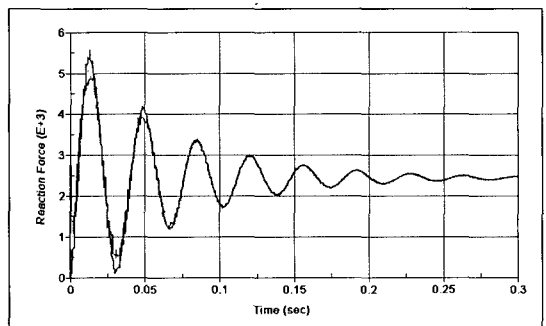
Table 2에는 자중을 고려하지 않은 해석 결과도 함께 수록하여 비교하였다. 저속 운전의 경우 자중의 영향이 변형의 85%, 고속 운전의 경우 58%를 차지하므로 동적 해석에서는 자중을 무시할 수 없음을 알 수 있다. 그러나 현재 크레인 운전 속도보다 충돌 속도가 아주 커지면 충돌에 의한 충격의 영향이 자중의 영향을 압도하게 될 것으로 예상된다.

시간이 경과함에 따라 작업대의 변형이 어떤 상태로 수렴하는지 알아보기 위해 구조적 감쇠(structural damping)를 고려한 해석도 수행하였다. 실제의 경우 구조적 감쇠가 존재하며, 이는 진동의 진폭을 감쇄시키고 주기를 증가시키는 효과를 가진다. 그러나 정확한 감쇄 계수는 예측하기 곤란하므로, 본 논문에서는 적절한 감쇄 계수를 가정하고 정적 상태에 도달했을 때의 변형을 관찰하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 시간에 따른 작업대 중앙 앞부분의 수직 변위와 작업대의 반력(reaction force)의 변화를 각각 보여준다. 시간이 경

과함에 따라 반력은 적재되는 원통형 물체의 무게인 250 kgf(2.45 kN)으로 수렴함을 볼 수 있다. Fig. 7에서 최대 수직변위는 0.85 mm로써 구조적 감쇄가 없는 경우인 0.97 mm 보다 12% 작음을 볼 수 있으며, 비교를 위해 이 값과 이때의 von-Mises 응력값을 Table 2에 포함시켰다. 보수적 관점에서 안전성 평가는 구조적 감쇄가 없는 해석 결과에 기초하는 것이 바람직하다. 수직 변위는 시간이 지남에 따라 0.4 mm 정도로 수렴함을 볼 수 있는데, 앞 장의 정적 해석의 결과인 0.48 mm 보다 17% 작은 값이다. 이런 차이는 하중 및 경계 조건들을 적용하는 방법의 차이에 기인한 것으로, 동적 해석에서는 작업대의 굽힘 변형으로 인해 원통형 물체의 중심부에서는 접촉이 일어나지 않고 외곽 부위에서만 하중을 받게 되기 때문이다. 이 경우 작업대 중앙 앞부분이 직접 하중을 받지 않으므로, 전 영역에 균일하게 하중이 가해지는 정적 해석보다는 작은 수직 변위가 발생하게 된다. 이를 검증하기 위해 접촉 문제로 가정하고 정적 해석을 수행하였는데, 이때 얻어진 최대 처짐량은 0.40 mm로써 Fig. 7에서 수렴



**Fig. 7. History of maximum deflection**



**Fig. 8. History of reaction force**

하는 값과 일치한다. 이는 앞 장에서의 정적 안전성 평가가 보수적으로 이루어졌음을 의미한다.

핫셀 운전시 운반용기의 취급사고와 같이 물품을 떨어뜨리는 일이 발생하는 것을 가정할 수 있다. 이때의 구조적 안전성 평가를 위해 원통형 물체를 작업대에 낙하시키는 것으로 가정하고 낙하 높이에 따른 동적 거동을 해석하였다. 낙하 높이를 500 mm 까지 증가시켜 보았으며, 이때의 최대 처짐량과 최대 von-Mises 응력의 변화 추이를 Fig. 9과 Fig. 10에 각각 나타내었다. 가상사고 조건의 경우 본 논문에서는 재료의 항복으로 인한 소성 변형 발생 여부, 소성 변형이 일어났다면 재료의 파손 및 구조의 붕괴 여부를 안전성 평가의 판단 기준으로 한다. 사고의 경우 최소한 재료의 파손이나 구조의 붕괴에 대한 안전성은 확보

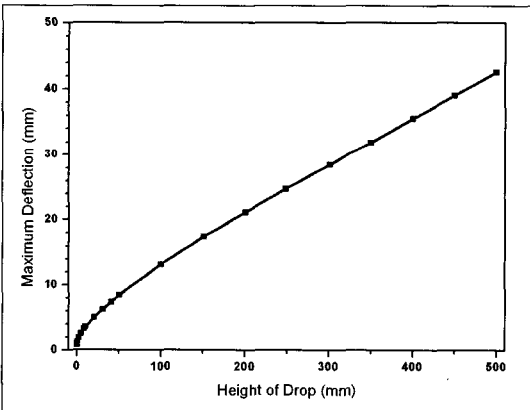


Fig. 9. Relationship between maximum deflection and height of drop

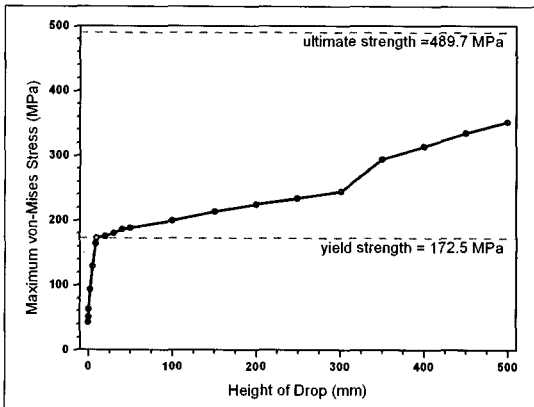


Fig. 10. Relationship between maximum von-Mises stress and height of drop

하여야 한다. 과도한 변형으로 인한 재료의 파손은 상당응력(equivalent stress)인 von-Mises 응력과 재료의 극한강도와와의 비교를 통해 판단한다. Fig. 10을 보면 낙하 높이가 10 mm일때 발생한 최대 응력이 항복응력에 도달하게 되며, 이때의 충돌 속도는 0.44 m/s 이다. 따라서 10 mm 높이 이하에서 낙하하는 경우 작업대는 탄성 변형만을 하게 되어 구조적으로 안전하다 할 수 있다. 그러나 이런 판단은 안전계수 (safety factor)를 고려하지 않은 것으로, 실제로는 보다 보수적으로 평가되어야 할 것이다. 물체가 10 mm 이상의 높이에서 떨어지는 경우 소성 변형이 발생하게 되며, Fig. 11과 Fig. 12는 낙하 높이가 500 mm 일때의 변형 형상과 응력 분포를 각각 보여준다. 이때의 최대 처짐량은 43 mm 이며, 작업대의 굽힘 변형 때문에 적재되는 물체의 중심부에서는 접촉이 일어나지 않고 있다. 또한 작업대가 붕괴되지 않고 프레임에 의한 지지가 유지되고 있음을 변형 형상을 통해 볼 수 있다. 최대 응력은 정적 해석의 경우와 마찬가지로 작업대 아래쪽의 C형강에서 발생하며, 최대 응력값은 351.8 MPa 로써 극한강도인 489.7 MPa 보다

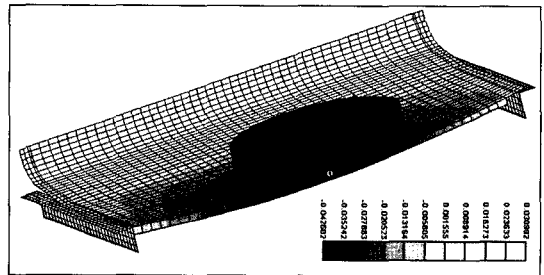


Fig. 11. Deflection contour for dynamic analysis

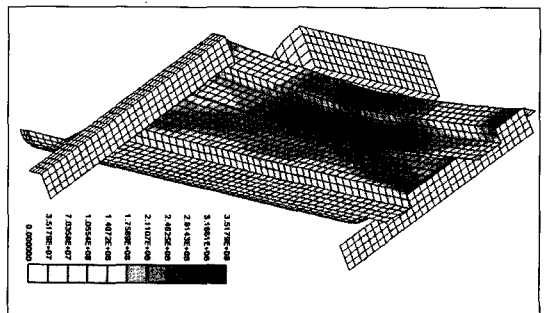


Fig. 12. von-Mises stress contour for dynamic analysis

낮은 값으로 재료의 파손은 일어나지 않았다.

#### IV. 결론

차세대관리 종합공정 실증을 위한 핫셀의 개폐형 작업대의 구조적 안전성을 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 작업대에 공정 물품들을 보관하는 경우 내연적 기법을 이용한 정적 해석을 통해 안전성 평가를 하였으며, 보수적 평가를 위해 실제 하중조건보다 큰 하중을 고려하였다. 이경우 수직 방향의 최대 처짐은 두께의 8%, 최대 von-Mises 응력은 항복 응력의 14% 정도로 구조적으로 충분히 안전함이 확인되었으며, 작업대 아래에 보강한 C형강이 구조적 안전성에 크게 기여함을 알 수 있었다. 핫셀 크레인을 이용해 저속 또는 고속으로 공정 물품들을 하역하는 경우 충돌-접촉 문제를 가정한 동적 해석을 통해 안전성 평가를 수행하였으며, 동적 해석의 효율성을 고려하여 외연적 기법을 사용하였다. 크레인을 고속으로 운전하여 물품을 적재하는 경우에도 최대 처짐은 작업대 두께의 17%, 최대 응력은 항복응력의 30% 미만으로 구조적 안전성이 확보되고 있으며, 구조적 감쇄를 고려할 경우 정적 해석의 결과에 수렴함을 볼 수 있었다. 또한 가상사고 조건을 고려하여 물품이 낙하하는 경우 재료의 파손이나 구조 붕괴에 대한 안전성을 동적 해석을 통해 평가하였는데, 물품이 50 cm 높이에서 낙하하여 작업대에 떨어지는 경우에도 작업대의 파단이나 붕괴가 일어나지 않고 안전성이 유지되었다.

#### 참고문헌

[1]유길성, 정원명, 구정희, 조일제, 박성원, 이은표, 안상복, 백상열, 이기순. 차세대관리 종합공정 실증시설 설계요건서, 한국원자력연구소 보고서, KAERI/TR-2004/2002 (2002)

[2]ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II, Part D-Properties, Americal Society of Mechanical Engineers, New York (2004)

[3]구정희, 서기석, 이주찬, 정성환, 방경식, 조수행, 박

윤규, 정의영. KSC-7 수송용기 구조설계 보고서, 한국원자력연구소 보고서, KAERI-NAMAC/TR-35/96 (1996)

[4]R. Whirley and B. Engelmann, "Automatic contact algorithm in DYNA3D for crashworthiness and impact problems," Nuclear Engineering and Design, 150, pp. 225-233 (1994)