

컨테이너형태의 방사성물질 A형 운반용기에 대한 구조해석

Structural Analysis for the Container-Shaped Type A Package of Radioactive Materials

이 영 신* 이 호 철** 정 성 환*** 이 흥 영*** 김 용 재****
Lee, Young-Shin Lee, Ho-Chul Chung, Sung-Hwan Lee, Heung-Young Kim, Yong-Jae
(논문접수일 : 2000년 6월 29일 ; 심사종료일 : 2001년 6월 12일)

요 지

원자력발전소의 1차 계통에서 오염된 장비들을 취급이 용이하고 안전하게 운반하기 위한 운반용기는 내부의 방사성 물질에 대한 방사능 평가에 의하여 방사성물질 A형 운반용기로 분류된다. 방사성물질 A형 운반용기는 IAEA Safety Standard Series No. ST-1 및 국내 원자력법 등 관련규정의 기술기준을 만족하여야 하는데, 운반용기는 중량에 따라 0.3~1.2m의 높이에서 소성이 일어나지 않는 단단한 바닥면으로 가장 심각한 손상을 주는 방향으로 낙하시키는 정상운반조건(normal transport conditions)에 대하여 구조적 건전성을 유지하여야 한다. 여기서는 ABAQUS/Explicit 코드를 이용하여 컨테이너형태의 A형 운반용기에 대하여 최대손상이 야기되는 0.9m 경사낙하조건에 대한 3차원 충격해석을 수행하고 구조적 건전성을 평가하였는데, 운반용기는 경사낙하시 코너피팅(corner fitting)의 분쇄(crush)에 의하여 대부분의 충격을 흡수하였으며 운반용기의 격납경계는 구조적 건전성을 유지하였다.

핵심용어 : 방사성물질, A형 운반용기, 정상운반조건, 자유낙하충격

Abstract

The package to handle easily and transport safely the equipment contaminated in the primary system of Nuclear Power Plants is classified as Type A package of radioactive materials by the evaluation of radioactivity of internal contents. It must be satisfied with the requirements of Type A package in accordance with IAEA Safety Standards Series No. ST-1 and domestic regulations such as Atomic Energy Act. The package must maintain the structural integrity for the requirements of normal transport conditions, which is dropped onto the unyielding flat target in the position expected to produce maximum damage from the height of 0.3m to 1.2m depending upon the weight of the package and contents. In this paper, the 3D impact analysis using ABAQUS/Explicit code for the 0.9m oblique free drop condition causing maximum damage for the container-shaped Type A package was performed and the structural integrity of the package was evaluated. The corner fitting of the package was crushed and the major portion of impact was absorbed, and the containment of the package maintained the structural integrity.

Keywords : radioactive material, type A package, normal transport condition, free drop impact

* 정희원 · 충남대학교 기계설계공학과, 교수

** 현대자동차 아산품질관리부

*** 한수원(주) 원자력환경기술원

**** 한국원자력안전기술원

• 이 논문에 대한 토론을 2001년 9월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

A형 운반용기는 핵연료 초음파탐상시험장비 등 원자력발전소의 1차 계통에서 사용하고 방사성물질에 오염된 장비들을 발전소간 순회운동을 위하여 취급이 용이하고 안전하게 운반하기 위하여 컨테이너형태로 제작된 용기이다. 이러한 운반용기는 내부의 오염된 장비에 대한 방사능평가에 의하여 IAEA Safety Standards Series No. ST-1¹⁾, 국내 원자력법 및 과기부 고시 제96-38호²⁾ 등 관련규정에서 규정하고 있는 방사성물질 A형 운반용기(Type A package)에 대한 요건들을 만족시켜야만 한다. 운반용기는 내용물을 포함한 용기 중량에 따라 0.3~1.2m의 높이에서 최대손상이 예측되는 방향으로 소성이 되지 않는(unyielding) 편평한 바닥면 위로 자유낙하하여 충돌하는 정상운반조건에 대하여 구조적 건전성을 유지하여야 한다.

운반용기의 낙하충격에 대하여 동적거동을 분석하고 그 영향을 평가하여 충격특성을 파악하는 연구는 원자력산업이 발달된 세계 각국에서 활발하게 이루어지고 있다. 1990년대 이전에는 충격재료에 대한 특성연구를 시작으로 운반용기의 내충격특성 및 건전성을 평가하였으며, 낙하충격을 받는 운반용기의 거동에 대한 실제적이고 정확한 분석을 위하여 용기의 치수를 선형적으로 축소시킨 축소모델(scaled-down model)을 이용하여 시험에 의한 동적응답을 연구하였다. 최근에는 컴퓨터의 급속한 발달과 전산코드의 지속적인 개발로 인하여 전산해석에 의한 평가방법이 널리 활용되고 있으며, 근사적 방법으로 해를 구하는 전산해석에 대한 신뢰도를 높이기 위하여 노력하고 있다. 1978년 미국 BCL의 Robinson등³⁾은 다중셀 운반용기에 대한 1/8, 1/4 및 1/2 축소모델을 이용하여 낙하시험을 수행하고 동적응답에 관하여 연구하였다. 1984년 일본의 Yagawa등⁴⁾은 단순형태를 갖는 운반용기의 충격문제에 관하여 여러 종류의 전산코드로서 해석을 수행하고 결과를 비교 검토하여 충격으로 인한 동적거동을 분석하였다. 1987년 미국의 Nelson등⁵⁾은 충격해석에 대한 해석기법을 평가하기 위하여 준정적법, 동적 집중매개변수법 및 유한요소법 등을 비교하고, 충격에 대한 비선형거동 및 응력회복거동을 파악하는 것은 유한요소법에 의한 동적해석기법이 타당하다고 제시하였으며, 운반용기의 자유낙하조건과 같은 저속충돌은 외연적(explicit) 시간적분방식과 내연적(implicit) 시간적분방식에 의한 동적해석결과가 일치한다고 하였다. 1989년 미국의 Pfeiffer⁶⁾ 등은 2차원 및 3차원 유한요소법과 준정적법

을 이용하여 충격거동을 계산하는 단순계산법에 대한 비교연구를 하였다. 국내에서도 원자력연구소, 원자력환경기술원 및 원자력안전기술원 등에서 운반용기의 충격거동을 분석하였다.^{7)~12)}

운반용기의 낙하충격해석에 대한 이론 및 시험연구가 여러 나라에서 많이 수행되어 왔으나 실험에 의한 연구는 시험모델 및 시험설비 등 비용이 많이 소요되기 때문에 현재는 주로 해석적 방법을 이용하고 있다. 낙하충격거동의 해석방법은 일반적으로 준정적법, 집중질량 매개변수법 및 유한요소법 등이 사용되고 있는데, 특히, 유한요소법은 비선형이 포함된 문제 및 실제적 경계조건이 적용되는 문제에 대하여 비교적 정확한 해를 제공하기 때문에 널리 사용되고 있다. 운반용기의 낙하충격과 같은 고도의 비선형 거동에서는 3차원 해석을 수행하여야 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있다.

여기서는 컨테이너형태 A형 운반용기의 정상운반조건인 0.9m 자유낙하조건에서 최대손상이 야기되는 경사낙하에 대하여 외연적 시간적분방식을 적용하는 ABAQUS/Explicit ver.5.8 코드^{13)~14)}를 이용하여 3차원 충격해석을 수행하고 운반용기의 구조적 건전성을 평가하였다. 운반용기는 경사낙하시 코너피팅의 분쇄에 의하여 대부분의 충격을 흡수하였으며 운반용기의 격납경계는 구조적 건전성을 유지하였다.

세계 각국에서는 원전 내에서 오염된 장비와 같은 중저준위 방사성물질의 운반을 위하여 여러 형태의 운반용기를 개발하여 사용하고 있다.^{15)~16)} 특히, 대량운반을 위하여 상용의 ISO형 컨테이너를 많이 사용하고 있는데, 이러한 ISO형 컨테이너가 내부기밀 및 자유낙하조건 등에 대한 구조적 건전성을 유지하는지 평가를 통하여 관련규정의 방사성물질 운반용기에 대한 요건을 만족시키고 있다. 국내에서도 원자력법의 개정을 통하여 IP형(산업형) 운반용기를 도입하였으며, ISO형 컨테이너를 이용하여 방사성물질의 운반이 가능하도록 하였다. 여기서 분석한 컨테이너형태의 운반용기의 충격거동에 대한 분석, 특히, 코너피팅부의 충격흡수효과에 대한 분석을 통하여 향후 ISO형 컨테이너를 이용한 방사성물질 운반용기에 대하여 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

2. A형 운반용기

A형 운반용기는 각 원자력발전소의 1차 계통(primary

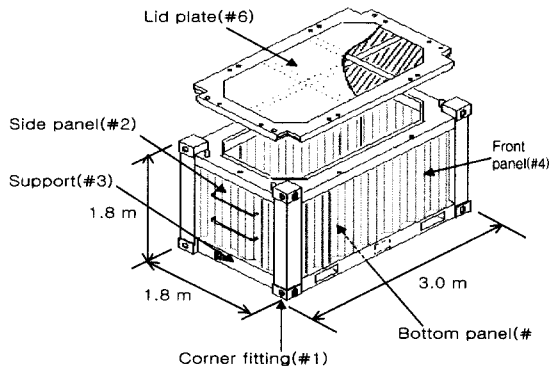


Fig.1 Overview of the container-shaped Type A package

system)에서 사용되어 방사성물질에 오염된 핵연료 초음파탐상시험장비, 유압방진기 성능시험장비 및 핵연료 육안검사장비 등을 운반하기 위한 용기로 Fig. 1에 나타난 것처럼 1.8m×1.8m×3.0m 크기의 컨테이너형태로서 본체(body) 및 뚜껑(lid)으로 구성된다. 운반용기의 본체는 두께 3mm의 주름진(corrugated) 스테인리스강판으로 된 셸구조물, 각 모서리가 스테인리스강 사각튜브로 된 지지물(support) 및 스테인리스강판의 바닥면(bottom panel)으로 구성되고, 뚜껑은 스테인리스강재의 뚜껑플랜지, 스테인리스강판, 내부의 보강재 및 폴리우레탄폼으로 이루어진다. 또한, 내부공간의 격납경계에 대한 밀봉을 유지하기 위하여 본체의 상부면과 뚜껑플랜지의 하부면 사이에 기밀개스킷(seal gasket)을 설치하고 12개의 뚜껑볼트로써 체결한다. 이러한 운반용기의 중량은 약 2.2톤이며, 내부의 장비중량 약 3톤을 포함하여 총중량이 약 5.2톤에 이른다.

운반용기의 주요 구조재는 스테인리스강재인 SA240 Type304이며, 구조해석에 적용한 재료의 역학적 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of SA240-304

Modulus of elasticity	186.8GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield strength	258.6MPa
Ultimate strength	1034MPa
Strain hardening modulus	1895MPa
Density	7913kg/m ³

3. 충격해석

IAEA Safety Standards Series No.ST-1 및 과학기술부 고시 제96-38호 등 국내외의 관련규정에서 규정하는 A형 운반용기의 정상운반조건에 대한 자유낙하조건을 기준하여 운반용기가 소성이 되지 않는 편평한 바닥면 위로 자유낙하하여 충돌하는 조건에 대하여 3차원 충격해석을 수행하고 운반용기의 구조적 건전성을 평가하였다. 낙하방향은 가장 심한 충격이 예측되는 운반용기의 무게중심과 최하단 모서리를 잇는 선이 중력방향과 일치하도록 하는 경사낙하를 기준하였다. 자유낙하높이는 관련규정에서, 내용물을 포함하여 용기의 총중량이 5톤 미만이면 1.2m, 5톤 이상 10톤 미만이면 0.9m 및 10톤 이상이면 0.3m를 기준하여야 하는데, 컨테이너형태 A형 운반용기는 총중량이 5.2톤이므로 0.9m 자유낙하조건을 적용하였다.

해석은 미국 HKS사에서 개발한 ABAQUS/Explicit ver.5.8 코드를 이용하였다. 해석코드는 중앙차분법을 이용한 외연적 시간적분을 적용하는 것으로, 이 알고리즘은 조건적으로 안정하기 때문에 해의 안정성을 위하여 시간증분(time increment)은 코드 내에서 자동으로 계산되어 설정된다. 또한, 이 코드는 물체의 접촉면을 따라서 미끄러짐이 가능하도록 접촉-충격 알고리즘을 가지고 있으며, 단단한 바닥면을 해석적으로 취급할 수 있는 강체표면 경계조건을 적용할 수 있다.

3.1 해석모델

운반용기의 자유낙하조건에 대한 동적충격해석은 유한요소법을 적용하여 자유낙하로 인한 충격하중의 이력에 대하여 변형 및 응력에 관한 해를 구하는 것이다. 해석모델은 Fig. 1에 나타난 것처럼 컨테이너형태의 운반용기를 기준하여 ABAQUS/Explicit 코드를 이용한 충격해석에 적용되도록 하였다. 해석모델에 사용한 유한요소는 충돌조건인 비선형 동접촉문제에 대하여 해의 정확도를 높이기 위한 저차의 선형요소인 셸요소(S4R)이다. 이 요소는 4절점 6자유도를 갖고 적분점이 중앙에 하나인 감차적분방식(reduced integration method)을 이용한다. ABAQUS/Explicit 코드는 해석대상인 물체의 거동이 매우 큰 비선형성을 나타낸다는 가정때문에 저차의 선형요소를 사용하는 것이 보다 효과적이다. 운반용기가 충돌하는 소성이 되지 않는 편평

한 바닥면은 강제면 모드를 적용하여 마찰이 없는 것으로 가정하였다. 접촉면을 통하여 단지 수직응력만이 전달되는 것으로 하였으며, 접촉면에서의 과도한 불연속 접촉을 방지하고 국부적 단면변형에 따른 충돌시 에너지손실이 쉽게 흡수되도록 경화면접촉을 고려하였다. A형 운반용기는 용기의 내부에 3톤에 해당하는 질량을 고려하여야 하며, 낙하높이는 0.9m이다. 방사성물질 운반용기는 관련규정의 기술기준에 따라 용기에 대하여 가장 손상이 심한 방향으로 낙하조건을 고려하여야 하는데, 여기서는 손상이 가장 크게 나타난 경사낙하조건에 대하여 해석을 수행하였다. 낙하방향은 용기의 무게중심과 코너피팅을 잇는 벡터방향인데, 하중조건은 0.9m에서의 자유낙하로 인한 4.2m/sec의 초기속도로써 단단한 바닥면에 충돌하는 문제로 구성하였다.

3.2 민감도해석(Sensitivity Analysis)

외연적 동해석방법은 수많은 시간증분에서의 각 절점 및 요소들의 결과를 모두 기록하여야 하기 때문에 절점수가 많을수록 정확도는 높아지지만, 그 계산시간은 기하급수적으로 증가하게 된다. 이러한 계산시간은 해의 정확도와 비례관계가 있으므로, 해의 정확도와 계산시간을 동시에 만족시키는 절점수를 찾는 것은 매우 중요한 일이다. 특히, 감차적분방식의 선형요소들은 hourglass 모드(강제모드)를 발생시킬 수 있기 때문에 요소의 크기를 적절하게 선택하지 않으면 해의 신뢰도가 크게 떨어지는 경우가 있다.

여기서는 충돌이 시작되는 코너피팅부의 절점수를 2배수로 증가시켜가며 5가지의 서로 다른 요소수를 갖는 해석모델에 대하여 최초로 충돌이 시작되는 코너피팅과 거리가 가장 먼 대각선 방향의 코너피팅의 x-방향 변위를 고찰하여 수렴성을 검토하였다. 또한, 코드 자체에서 자동으로 계산되는 시간증분은 다소 보수적이지만, 어느 정도의 안정성을 인정할 수 있기 때문에 시간증분의 변화에 따른 해의 수렴성은 고찰하지 않았다. 요소의 수에 따른 변위의 수렴성 해석에서 총 해석시간은 0.001초로 매우 짧은 순간의 결과를 고찰하였다.

Fig. 2는 각 해석경우의 해석모델에 대한 변위량을 나타낸다. 해석결과, 2000여개의 절점을 갖는 유한요소모델이 해석결과와 해석시간을 모두 적절하게 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 해석에서는 절점수 1861개의 유한요소모델을 적용하기로 하였다.

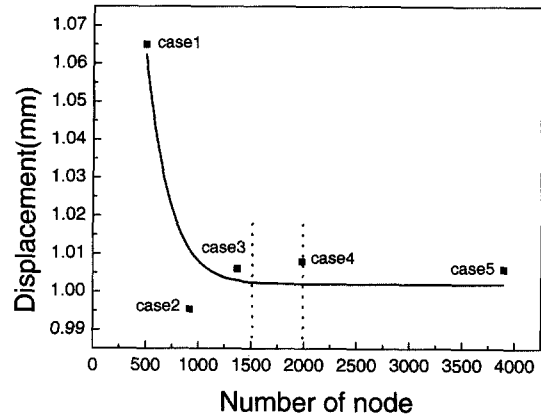


Fig. 2 Displacement convergence on each FE model

4. 해석결과

외연적 시간적분방식을 이용한 총 해석시간은 0.03초를 적용하였다. Fig. 3은 운동에너지(kinetic energy) 및 변형에너지(strain energy)에 대한 시간이력을 보여준다. 변형에너지 및 운동에너지는 운반용기가 재반동되는 0.013초까지 계속 증가 및 감소하다가 재반동되는 순간부터 서서히 수렴하게 된다. 만일 총 해석시간을 보다 많이 적용하면, 운반용기의 재반동에 의한 2차 충격현상을 명확하게 볼 수 있을 것이다.

전체에너지(운동에너지+변형에너지)의 경우, 0.015초 근방에서 미소하게 그 값이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 충돌시 국부적 소성에 의한 에너지소산으로 볼 수 있다.

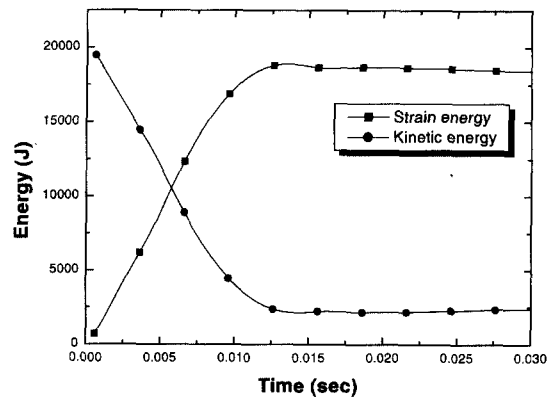


Fig. 3 Energy time history

4.1 응력강도 및 변형

충격동안 A형 운반용기에는 일련의 응력전파가 발생하게 되는데, 응력은 충돌이 시작되는 코너피팅으로부터 서서히 증가하여 측면 및 상, 하부패널로 전파된다. 가장 크게 변형할 때의 시간은 0.013초이며, 그 시간을 넘어서면 운반용기는 재반동되어, 국부적인 소성이 발생한 코너 피팅 및 지지물 부위를 제외하고 탄성거동을 보이게 된다. 코너피팅부는 소성변형으로 인해 충격순간의 변형에너지를 흡수하게 되며, 이 과정에서 다소의 에너지소산이 발생하여 전체에너지가 약간 감소하는 결과를 발생시킨다. 코너 피팅 및 지지물의 소성변형은 순간적으로 발생하는 극도의 충격력을 흡수하면서 나머지 부분의 응력강

도를 낮추어 결과적으로 운반용기 압력경계의 건전성을 유지한다. 코너피팅은 두께 12mm의 사각튜브 형태로서, 만일 내부가 동일한 재료로 채워진다면, 충돌순간에 발생하는 큰 응력을 다른 부위에 그대로 전달시키는 소위 강체거동을 보이게 되며, 이러한 거동은 다른 부위의 변형을 초래하여 압력경계에 심각한 영향을 끼칠 수 있다.

해석시간동안 응력강도(stress intensity)가 가장 크게 나타나는 곳은 역시 소성이 발생되는 코너피팅 및 지지물로, 재료의 항복응력을 초과하였다. 나머지 부분은 코너피팅 및 지지물과 비교하여 매우 낮은 응력강도를 보인다. Fig. 4에 운반용기의 충격동안 응력전파양상을 나타내었다. Fig. 5는 코너피팅이 최대로 변형되었을 때의 형상을 나타내고 있다.

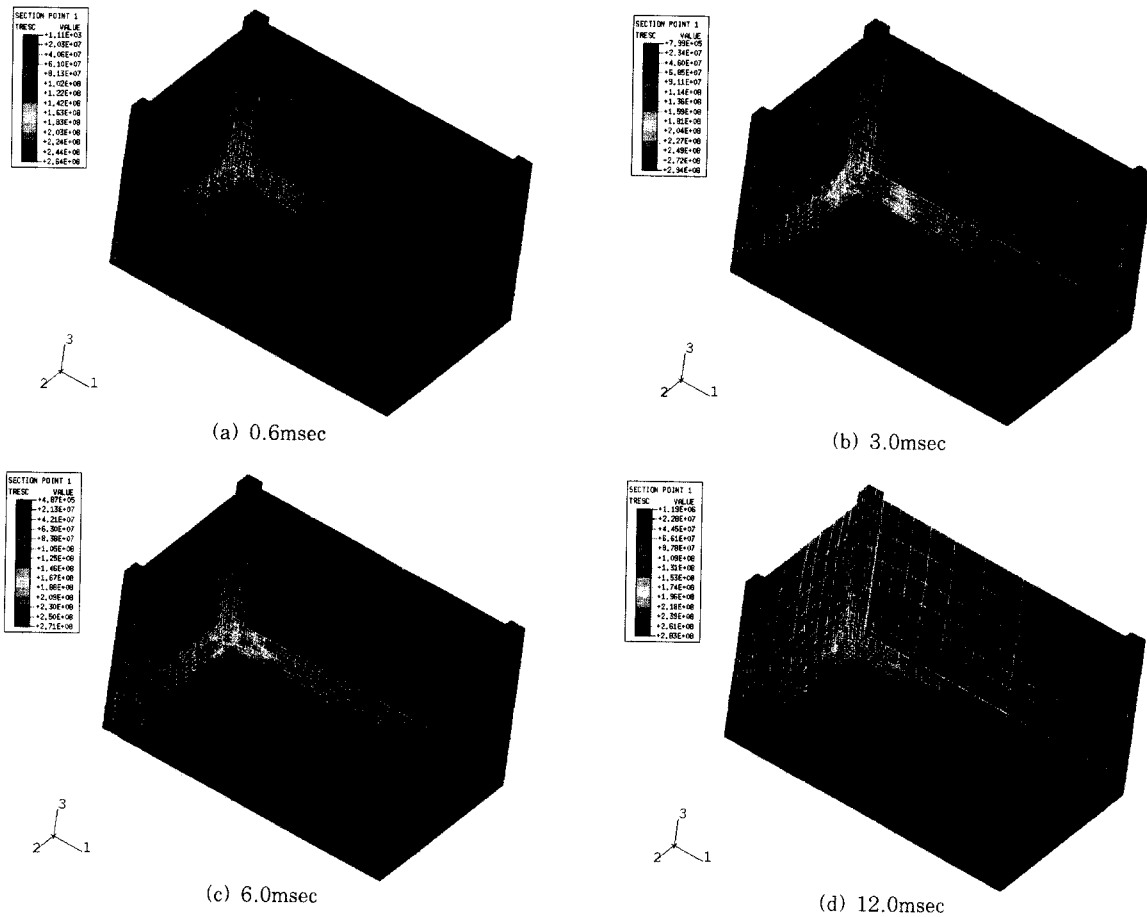


Fig. 4 Stress intensity propagation contour

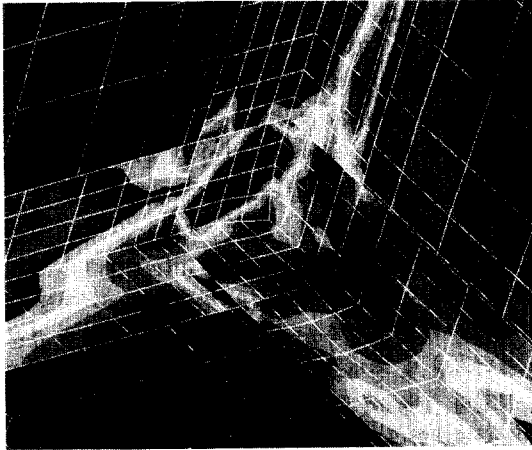


Fig. 5 Maximum deformed shape of the corner fitting

4.2 변위-시간 및 충격하중-변위 선도

Fig. 6은 접촉지점과 대각방향에 위치한 코너피팅의 절점에 대한 변위의 시간이력을 나타내고 있다. 좌표계의 설정때문에 그림에서 모든 방향의 변위가 음의 값으로 증가하다가 x- 및 y-방향의 변위는 0.013초 이후 다시 복원되는 양상을 보이고 있다. 이것은 앞서 기술한 대로 0.013초 이후에 운반용기가 재반동하기 때문이며, z-방향으로의 계속적인 증가는 운반용기의 회전에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 강체표면의 기준노드에서 발생하는 각 방향별 반력을 벡터적(積)으로 합성한 그림으로, 운반용기에 전달되는 충격하중을 나타내고 있는데, 충격하중은 약 0.017초 동안 최대 750kN이다. Fig. 8은 충격하중과 변위(절대값)와의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 6과 마찬가지로 x- 및 y-방향의 변위는 하중이 증가함에 따라 증가하다가 하중이 감소되기 시작하는 재반동 시점을 기준으로 서서히 영(0)으로 돌아오는 것을 볼 수 있다. 그러나 z-방향 변위는 하중이 완전히 없어진 후에도 계속 증가함을 보이고 있는데 이는 전술한 대로 운반용기의 회전에 의한 현상이다. 또한 y-방향 변위 역시 영(0)으로 돌아온 후에 다시 증가함을 볼 수 있는데 이 역시 용기의 회전에 의한 현상이다. 본 해석은 경사낙하 조건으로 인해 충돌후 용기의 회전이 발생하기 때문에 하중-변위 관계로부터 운반용기의 충격흡수능력을 명확하게 관찰할 수 없었다.

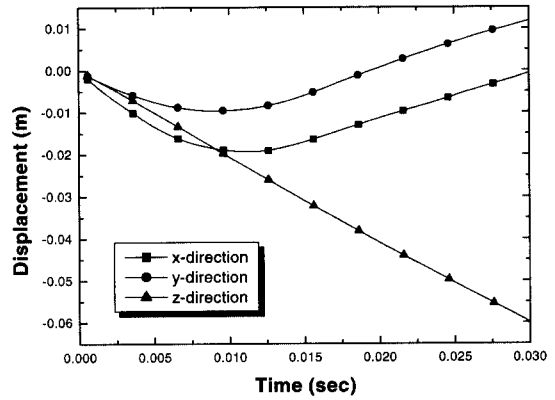


Fig. 6 Displacement time history

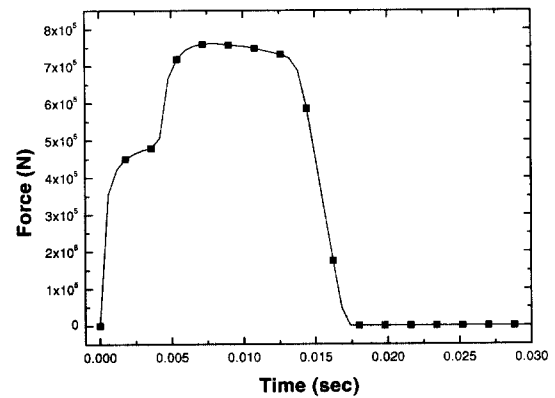


Fig. 7 Impact force time history

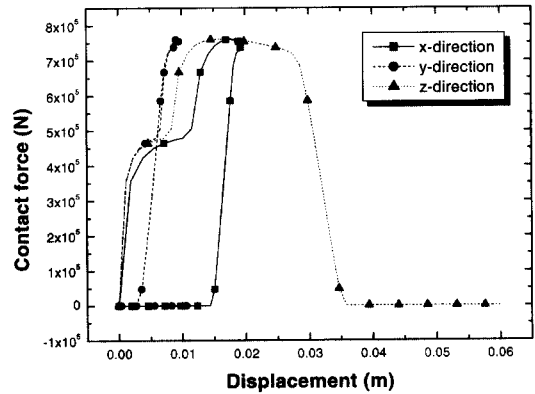


Fig. 8 Force-displacement time history

4.3 응력강도

Fig. 9는 A형 운반용기의 주요 부위별 응력강도에

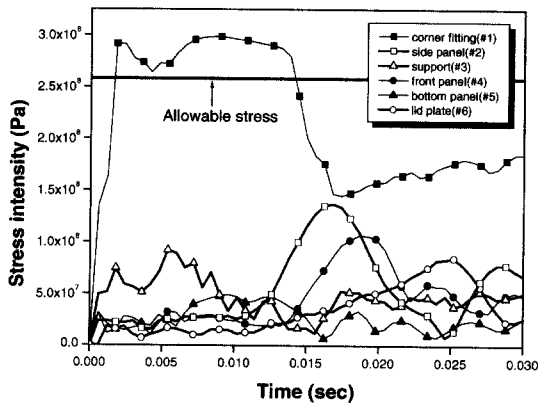


Fig. 9 Stress intensity time history on each part of the package

대한 시간이력을 나타낸다.

운반용기의 구조적 건전성은 해석에 의하여 계산된 응력이 Tresca의 최대전단응력이론에 따라 쉘단면의 두께를 따라 균일하게 분포하는 일차막응력(primary membrane stress), 수직응력중에서 쉘의 두께를 따라 변하는 응력성분인 일차굽힘응력(primary bending stress) 및 열하중 등에 의한 이차응력(secondary stress) 등의 응력강도(stress intensity)로 분류되어 허용응력과 비교하여 평가한다. 정상운반조건의 경우, 운반용기 각 부위에서 계산된 최대응력강도는 실제응력강도의 1.5배(항복응력과 동등한 응력값) 이하이어야 한다. 그림에서 알 수 있듯이 응력강도는 코너피팅에서 가장 크게 나타나고 나머지 부위에서는 상대적으로 매우 낮은 값을 보이고 있다. 이것은 코너피팅에서 1차적으로 충격력을 받으면서 국부적인 소성으로 인해 대부분의 충격량을 흡수하기 때문이며, 시간이 지나면서도 이 코너피팅은 소성에 의한 잔류응력이 계속 남아있게 된다. 앞에서 기술한 것처럼 만일 코너피팅이 튜브 형상이 아니고 솔리드(solid) 형상이라면 분쇄현상이 둔화되어 많은 충격력을 다른 부위에 전달하기 때문에 운반용기에 나쁜 영향을 끼치게 된다. 또한, 약 0.015 초 이후부터 코너피팅의 응력강도가 저하되는 반면, 측면 및 전면패널에서는 응력강도가 증가하는 현상을 관찰할 수 있는데, 이는 코너피팅이 더 이상 분쇄되지 못하는 고밀화 현상(lock-up) 때문에 다른 부위로 응력이 전달되기 때문인 것으로 여겨진다. 결과적으로, 코너피팅은 재료의 허용응력을 초과하지만 국부적 소성 변형에 의해 운반용기의 다른 부위에 전달되어야 할 상

당량의 충격력을 흡수시켜 주었다.

5. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소에서 사용하는 오염된 장비를 운반하기 위한 컨테이너형태의 A형 운반용기에 대한 구조해석을 수행하였다. 해석은 IAEA 규정 및 국내 원자력법 등에서 제시하는 기술기준에 따라서 수행하였으며, 해석은 ABAQUS/Explicit ver.5.8 코드를 이용하였다.

Table 2는 컨테이너형태의 A형 운반용기의 경사낙하에 대한 해석결과를 정리하였는데, 최대응력강도는 300MPa로써 코너피팅에서 발생하였다. 이는 코너피팅의 소성에 의한 현상으로 규정의 허용응력인 258MPa를 초과하였다.

코너피팅부에서 이렇게 응력이 높게 나타나지 않고 소성되지 않는다면 운반용기의 다른 부위에 상당히 높은 응력이 발생할 가능성이 높다. 다시 말하면, 코너피팅의 국부적 소성에 의한 충격에너지 흡수는 다른 부위의 응력증가를 억제하기 때문에 운반용기의 압력경계를 유지시켜 주고 있는 것이다.

따라서, 컨테이너형태 A형 운반용기는 0.9m 경사낙하조건에 대하여 코너피팅의 분쇄에 의하여 대부분의 충격에너지를 흡수하였으며, 용기의 압력경계를 형성하는 어느 부위에서도 관련규정의 허용응력을 초과하지 않으므로 구조적 건전성을 유지한다고 할 수 있다.

Table 2 Maximum stress intensity on each part of the Type A package

Components	Maximum stress intensity
Corner fitting	298MPa
Side panel	137MPa
Front panel	106MPa
Lid plate	85MPa
Bottom panel	49MPa
Support	92MPa
Allowable stress	258MPa

참 고 문 헌

- IAEA Safety Standards Series No. ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Ra-

1. "Radioactive Materials", 1996
2. 과학기술부 고시 제96-38호, "방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정", 1996
3. Robinson, R. A., Hadden, J. A. and Basham, S. J., "Experimental Studies of Dynamic Impact Response with Scale Models of Lead Shielded Radioactive Material Shipping Containers", BMI-2001, Battelle Columbus Lab., 1978
4. Yagawa, G., Ohtsubo, H., Takeda, H., Toi, Y., Aizawa, T. and Ikushima, T., "A Round Robin on Numerical for Impact Problems", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 78, No. 3, 1984, pp.377~387
5. Nelson, T. A. and Chun, R. C., "Methods for Impact Analysis of Shipping Containers", NUREG/CR-3966, Lawrence Livermore Nat. Lab., 1987
6. Pfeiffer, P. A. and Kennedy, J. M., "Free Drop Impact Analysis of Shipping Cask", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 114, No. 1, 1989, pp.33~52
7. 강희영외 15인, "KSC-4 수송용기 안전성분석보고서", KAERI/TR 137/89, 한국원자력연구소, 1989
8. 이영신, 김용재, "낙하충격하중을 받는 방사성물질 수송용기의 동적거동에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제11호, 1994, pp.2805~2816
9. 정성환, 이영신, "사용후핵연료 수송용기의 수평낙하충격에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제21권, 제3호, 1997, pp.457~469
10. 구정희, 서기석, 강희영, 김영진, "경사낙하충돌조건하의 사용후핵연료 수송용기의 동적거동에 대한 유한요소해석", 대한기계학회논문집, 제19권, 제12호, 1995, pp.3252~3259
11. Lee, Y. S., and Kim, Y. J., "Dynamic Structural Behavior of a Shipping Container under Drop Impact Loading", Transactions of the 13th International conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-13), Vol. 4, 1995, pp.431~436
12. Chung, S. H., and Lee, Y. S., 1997, "Impact Analysis for a Radioisotope Package", Transactions on the 14th International Conference on the Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-14), Vol. 6, Div.J., pp. 57~63
13. HKS Inc., *ABAQUS ver. 5.8 Theory Manual*, 1998
14. HKS Inc., *ABAQUS/Explicit ver.5.8 User's Manual*, 1998
15. Barlow, S. V, Donelan, P. and Janicki M. C, "Conceptual Design of Large Boxes for the Packaging of Intermediate and Low Level Radioactive Waste", *RAMTRANS*, Vol.5, No. 2~4, 1994, pp.201~206
16. Attwood, G. J., Butler, N. and Neilson, A. J, "Computer Modelling of the Impact Performance of Containers for the Transport of Radioactive Materials", *RAMTRANS*, Vol. 2, No. 1/3, 1991, pp.33~39