

A Preliminary Drop Test of a Type IP-2 Transport Package with a Bolted Lid Type

볼트체결방식의 IP-2형 운반용기의 낙하예비시험

Dong-Hak Kim, Ki-seog Seo, Hong Yun Park, Kyung Ho Lee*, Jeong-Hyoun Yoon*, Heung-Young Lee*

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon

*KHNP Co., Ltd. Nuclear Environmental Technology Institute, 150 Duckjin-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon

김동학, 서기석, 박홍윤, 이경호*, 윤정현*, 이홍영*

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

*원자력환경기술원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

dhkim@kaeri.re.kr

Abstract

A type IP-2 transport package should prevent a loss or dispersal of the radioactive contents and a more than 20% increase in the maximum radiation level at any external surface of the package when it were subjected to the drop test under the normal conditions of transport. If a shielding thickness of IP-2 transport package is thick, a bolted lid type may prevent a loss or dispersal of the radioactive contents than the door type of ISO containers which are generally used as a type IP-2 transport package. In this paper, to evaluate the effect of drop directions on the bolt tension and the coherence of a bolt, the drop tests of preliminary small model are tested and evaluated for seven directions before the drop test of a type IP-2 transport package with a bolted lid type under the normal conditions of transport. Seven drop directions which are a bottom-vertical drop, a lid-vertical drop, a horizontal drop and four corner drops have been carried out. Using a force sensor, the bolt tension during the drop impact is measured. The coherence of bolt is evaluated by the difference between the fastening torque of bolt before a drop test and the unfastening torque of bolt after a drop impact.

Key word : Type IP-2 transport package, the normal conditions of transport, a drop test, a bolted lid type.

요 약

IP-2형 운반용기는 정상운반조건의 낙하시험을 거친 후에 방사성내용물의 유실 또는 분산이 없고 외부표면에서의 방사선량률이 20% 이상 증가할 수 있는 차폐능력의 상실이 없어야 한다. 차폐체의 두께가 큰 경우에는, 볼트체결방식을 사용하면 IP형 운반용기로 많이 사용되고 있는 ISO 컨

테이너에서의 문을 사용하는 경우보다 방사성내용물의 유실 또는 분산이 일어나지 않을 것이다. 본 연구에서는 볼트체결방식의 IP-2형 운반용기에 대한 낙하시험을 실시하기 전에, 낙하방향에 따른 볼트인장력과 볼트체결력을 시험으로 평가하는 방법을 알아보기 위하여 예비시험모델을 제작하여 시험 및 평가하였다. 바닥과 뚜껑방향의 수직낙하, 수평낙하, 4방향의 경사낙하 등 총 7가지 낙하방향으로 자유낙하를 실시하였다. 낙하충격에 의한 볼트인장력은 힘센서를 이용하여 측정하였고, 볼트체결력은 낙하시험 전의 체결토크에서 낙하충격 이후의 풀림토크의 변화를 이용하여 알아보았다.

중심단어 : IP-2형 운반용기, 정상운반조건, 낙하시험, 볼트체결방식

1. 서 론

원전에서 발생하는 다양한 방사성폐기물을 작업자 및 공공의 안전을 위하여 국내 원자력법, 시행령 및 시행규칙 등에서 규정하고 있는 운반법규[1~3]에 따라 안전하게 운반하기 위한 운반용기를 개발하여야 한다. 방사성폐기물 운반용기는 관련 법규에서 규정하는 운반용기의 분류에 따른 기술기준 및 요건을 만족하도록 안전성 해석 및 안전성 입증시험 등을 수행하여야 한다. 원전에서 발생하는 다양한 방사성폐기물을 운반하기 위해서는 B형 운반용기는 물론이고 관련법규에서 규정하고 있는 IP형, A형 운반용기 또한 개발되어야 한다. IP형 운반용기는 관련 법규에서 규정한 분류에 따라 다시 IP-1형, IP-2형 및 IP-3형 운반용기로 구분된다. IP-1형 운반용기는 운반용기의 일반기준에 적합하고 외부의 최소길이가 10센티미터 이상이며 방사성내용물의 최대수량이 제한되도록 개발하여야 한다. IP-2형 운반용기는 IP-1형 운반용기의 기술기준을 만족하고 정상운반조건에 대한 낙하시험 및 적층시험을 거친 후에 방사성내용물의 유실 또는 분산이 없고 외부표면에서의 방사선량률이 20%이상 증가할 수 있는 차폐능력의 상실이 없어야 한다. 원전에서와 같이 대량으로 생산된 방사성폐기물의 운반을 위해서는 전용 적재를 기본으로 가정하면 IP-3형 운반용기는 개발대상에서 제외된다. 그러므로 원전에서 발생하는 방사성폐기물을 대량으로 운반하기 위한 IP형 운반용기의 개발대상으로 IP-2형 운반용기가 중요하다.

원자력발전소에서 발생되는 방사성폐기물의 운반을 위한 방사성폐기물 운반용기에 대한 개발을 진행하고 있다.[4] 특히, 방사성폐기물 IP-2형 운반용기는 20~200 mRem/hr의 선량률과 200~2000 mRem/hr의 선량율을 가진 제2종 저준위 비방사능물질 또는 제3종 저준위 비방사능물질로 분류되는 운반내용물을 운반하기 위하여 차폐체 두께를 35mm와 80mm의 두 가지 종류로 구분하여 개발되고 있다. 이와 같이 차폐체의 두께가 큰 IP-2형 운반용기의 경우에는, 볼트체결방식을 사용하면 IP형 운반용기로 많이 사용되고 있는 일반적인 ISO 컨테이너의 문을 사용하는 경우보다 방사성내용물의 유실 또는 분산이 일어나지 않을 것이다. 본 연구에서는 볼트체결방식의 IP-2형 운반용기에 대한 낙하시험을 실시하기 전에, 낙하방향에 따른 볼트인장력과 볼트체결력을 시험으로 평가하는 방법을 알아보기 위하여 예비시험모델을 제작하여 시험 및 평가하였다. 바닥과 뚜껑방향의 수직낙하, 수평낙하, 4방향의 경사낙하 등 총 7가지 낙하방향으로 자유낙하를 실시하였다. 낙하충격에 의한 볼트인장력은 힘센서를 이용하여 측정하였고, 볼트체결력은 낙하시험 전의 체결토크에서 낙하충격 이후의 풀림토크의 변화를 이용하여 알아보았다. 낙하시험 전의 체결토크와 낙하충격 이후의 풀림토크의 변화가 낙하충격에 의한 볼트체결력의 차이만을 나타내는지

를 알기 위하여 낙하충격이 없는 상태에서 체결토크와 풀림토크의 차이를 알아보았다.

2. 낙하시험

IP-2형 운반용기의 낙하예비시험을 위하여 그림 1과 같은 예비시험모델을 제작하였다. 예비시험 모델의 총중량은 97.90 kg이고 뚜껑의 중량은 21.82 kg이다. 운반용기에서 사용될 인양 및 결속에 사용될 모서리쇠가 낙하충격에서 1차적으로 충격을 받도록 하는 것과 유사하게 예비시험모델에서도 각 모서리에 인양을 위한 구조를 튼튼하게 만들어 1차 충격을 먼저 받도록 돌출되어 부착하였다. 또한 상부와 하부의 각 변에 각관을 설치하여 운반용기의 각 변에 낙하충격을 흡수하기 위한 각관을 모델화 하였다. 체결된 볼트의 크기는 방사성폐기물 운반용기에 사용될 M24이며 상부에 8개를 사용하여 뚜껑을 체결하였다. 8개의 볼트 중에서 각 변에 하나씩 4개의 볼트에는 힘센서를 부착하여 낙하충격 시에 볼트의 인장력을 측정하였다. 그림 2는 IP-2형 운반용기 낙하예비시험모델에 힘센서 및 볼트의 부착에 대한 그림으로 볼트(Bolt 1, Bolt 2 등) 및 힘센서(Force 1, Force 2)에 대한 번호와 낙하방향을 보여준다. 볼트에 대한 번호순으로 볼트를 체결하였고 그 역순으로 볼트를 풀었다.

낙하충격시의 볼트인장력은 PCB사의 ICP 형식의 힘센서(model 206C)를 이용하여 20 kHz의 샘플링률로 취득하였다. 볼트인장력은 그림 3과 같은 NI사의 PXI 시스템의 PXI 4472 모듈을 통하여 측정하였다. 낙하충격에 의한 볼트체결력의 차이를 알아보기 위하여 낙하 전후에 볼트의 체결토크와 풀림토크를 측정하였다. 이러한 체결토크와 풀림토크의 차이가 낙하충격에 의한 볼트 체결력을 나타내는지 알아보기 위하여 낙하충격이 없는 경우의 볼트체결토크와 볼트풀림토크를 알아보았다. 그림 2에서 보여주는 볼트에 대한 번호에 따라서 대칭되는 위치에 대하여 교차하여 8개의 볼트를 순서대로 체결하면서 체결토크를 측정하고 역순으로 볼트의 풀림토크를 측정하였다. 체결토크는 30, 50, 80 N·m이상의 세 가지 체결토크에 대하여 고려하였다. 또한 평위서와 스프링위서에 대한 영향을 알아보았다. Table 1은 평균 체결토크 및 풀림토크와 그 차

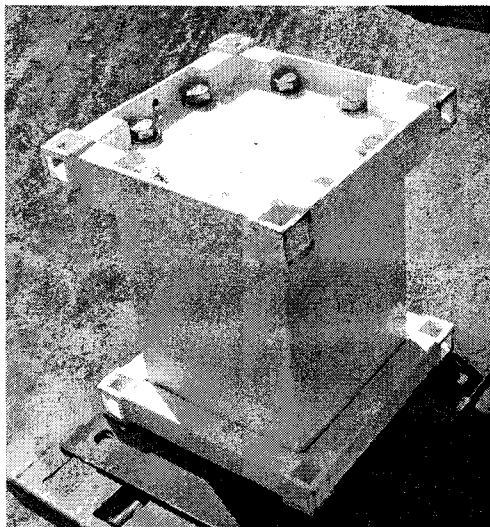


그림 1. IP-2형 운반용기의 낙하예비시험모델

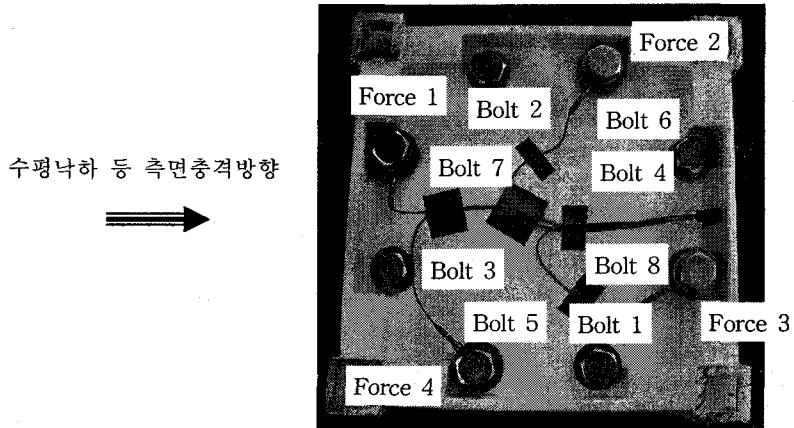


그림 2. 힘센서 및 볼트의 부착

이를 나타낸다. 체결토크와 풀림토크의 차이는 워셔가 없는 경우 가장 적으며 스프링워셔를 사용한 경우 가장 크다. 또한 체결토크가 큰 경우에는 체결토크와 풀림토크의 차이가 더 크다. 체결시의 플랜지와 워셔가 받는 탄성응력의 회복이 풀림토크의 감소로 나타난다. 탄성응력이 발생하는 플랜지, 워셔의 유무 및 체결토크의 양에 따라서 체결토크와 풀림토크의 차이가 변한다. 낙하충격의 전·후에 측정된 체결토크와 풀림토크의 차이가 낙하충격에 의한 볼트 체결력의 차이에 체결시의 볼트체결토크와 볼트풀림토크의 차이를 포함한다. 그러므로 낙하충격에 의한 볼트체결력의 차이는 볼트체결에 따른 토크의 차이를 고려하여야 한다.

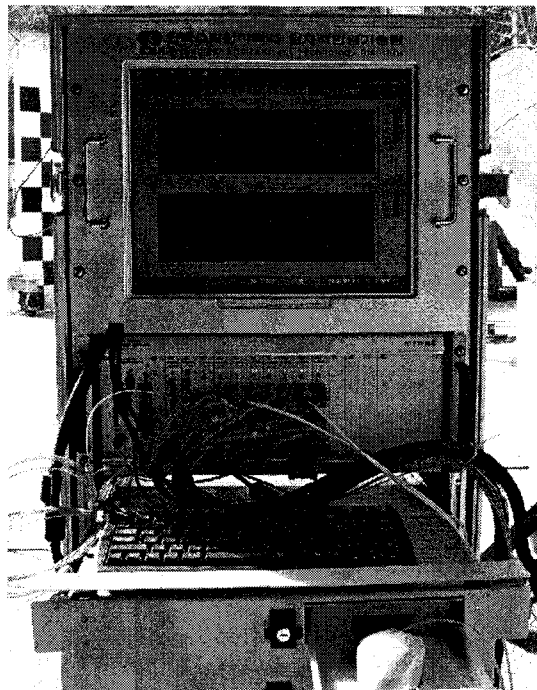


그림 3. 가속도, 볼트 힘, 변형율을 측정하기 위한 측정시스템(NI사의 PXI 시스템)

Table 1. 낙하충격이 없는 상태에서 체결토크와 풀림토크의 차이

조건	체결토크 (N·m)	풀림토크 (N·m)	차이 (N·m)
위셔가 없는 경우	31.26	26.40	4.86
	51.24	43.24	8.00
	82.36	65.58	16.79
평위서를 사용한 경우	30.60	24.81	5.79
	50.94	40.19	10.75
	81.34	66.18	15.16
스프링위서를 사용한 경우	30.74	21.34	9.40
	51.05	37.95	13.10
	81.96	60.11	21.85

낙하예비시험 모델을 릴리스장치에 고정하여 0.9 m 높이에서 자유낙하시켰다. 낙하방향은 그림 4와 같이 총 7개 방향으로 바닥수직낙하, 뚜껑수직낙하, 수평낙하, 바닥수직경사낙하, 바닥전단경사낙하, 뚜껑수직경사낙하, 뚜껑전단경사낙하이다. 수직낙하는 낙하충격방향과 볼트의 인장방향이 동일하다. 수평낙하는 낙하충격방향과 볼트의 전단방향이 동일하다. 수직경사낙하는 1차 충격 이후 2차 충격방향이 볼트의 인장방향과 동일한 방향으로의 낙하를 의미하며 전단경사낙하는 1차 충격 이후 2차 충격방향이 볼트의 전단방향과 동일한 방향으로의 낙하를 의미한다. 수평낙하 및 모든 경사낙하는 그림 2에서 보여주는 힘센서와 볼트의 위치에 대한 방향으로 낙하하였다.

3. 볼트 인장력

그림 5는 힘센서를 이용하여 취득한 낙하충격에서의 볼트인장력의 변화를 나타낸다. 수직낙하에서 돌출된 4개의 모서리쇠가 동시에 낙하충격을 받으면 모든 힘센서가 유사한 볼트인장력의 변화를 보여야 하지만 실제로 4개의 모서리가 다르게 낙하 충격을 받아서 약간 차이를 보인다. 그림은 낙하충격 시에 대한 변화로 힘센서의 대부분의 값이 낙하충격시의 큰 값의 진폭을 가진 낙하충격

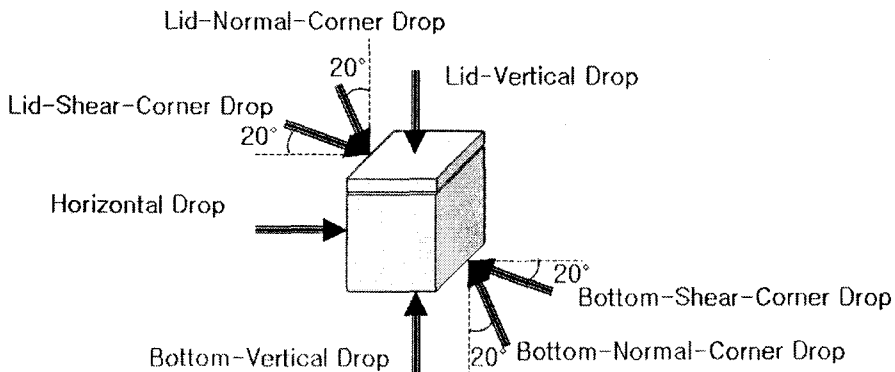
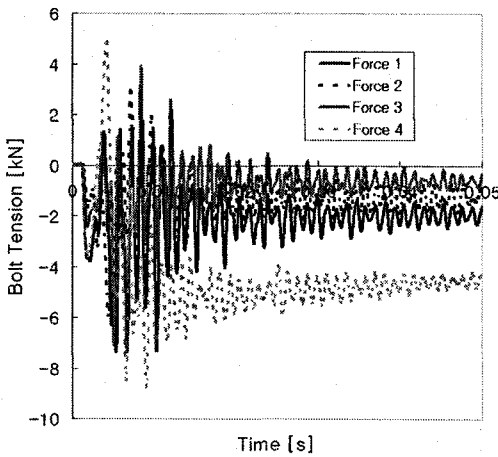
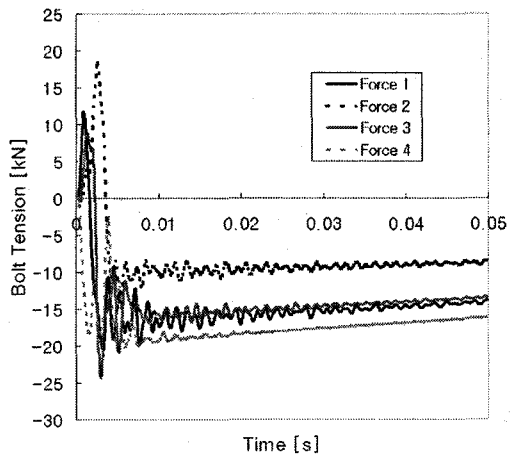


그림 4. 예비시험모델의 낙하방향

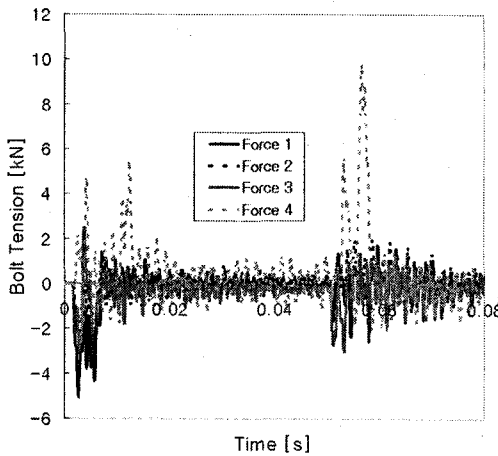
에 의한 변화와 함께 평균값이 뚜껑수직낙하시험에 대하여 최대 약 20 kN의 압축력에 대하여 작은 진폭의 볼트인장력의 변화를 보인다. 이는 볼트인장력의 감소를 의미한다. 뚜껑방향으로의 수직낙하와 경사낙하의 경우에는 이러한 볼트인장력의 감소가 크다. 바닥수직낙하의 경우 볼트인장력의 최대값이 가장 작으며 뚜껑수직낙하의 경우 가장 큰 최대값을 보인다. Table 2는 낙하방향에 따른 볼트인장력의 최대값 및 최소값을 보여준다. 뚜껑수직낙하시험에서 최대 볼트인장력의 증가인 18.5 kN을 보였으며 24.3 kN의 최대 볼트인장력의 감소를 보였다. 수평낙하시험에서 볼트인장력의 최대 증가는 낙하충격면에 가까운 Force 1번 힘센서에서 나타나며 경사낙하시험에서는 낙하충격면의 옆면에서 발생하였다.



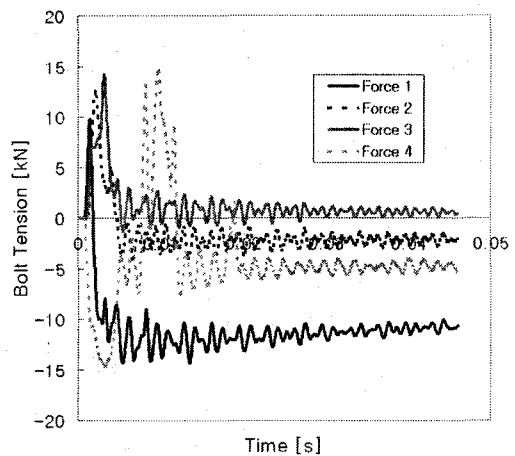
(a) 바닥수직낙하



(b) 뚜껑수직낙하



(c) 바닥수직경사낙하



(d) 뚜껑전단경사낙하

그림 5. 힘센서를 이용하여 취득한 볼트 인장력

Table 2. 낙하조건에 따른 볼트인장력의 최대값 및 최소값

Bolt tension [kN]		Force 1	Force 2	Force 3	Force 4	Average
Bottom-vertical drop	Minimum	-7.4	-5.9	-7.4	-8.7	-7.4
	Maximum	2.0	3.1	3.9	5.0	3.5
Lid-vertical drop	Minimum	-20.6	-14.3	-24.3	-20.2	-19.9
	Maximum	11.7	18.5	8.8	0.1	9.8
Horizontal drop	Minimum	-7.7	-9.8	-8.4	-4.4	-7.6
	Maximum	15.4	2.8	7.1	13.6	9.7
Bottom-normal-Corner drop	Minimum	-5.1	-2.7	-3.1	-2.3	-3.3
	Maximum	1.8	1.9	2.5	9.7	4.0
Bottom-shear-Corner drop	Minimum	-3.8	-10.2	-4.2	-5.9	-6.0
	Maximum	4.4	1.7	2.8	9.6	4.6
Lid-normal-Corner drop	Minimum	-6.6	-8.6	-4.4	-9.8	-7.4
	Maximum	8.5	3.9	11.6	12.8	9.2
Lid-shear-Corner drop	Minimum	-14.4	-4.2	-1.3	-14.8	-8.7
	Maximum	9.9	12.5	14.3	14.8	12.9

4. 볼트 체결력

Table 3은 낙하충격 전후의 볼트체결토크와 볼트풀림토크의 차이를 나타낸다. 체결토크는 80 N·m 이상으로 하였으며 최대 체결토크는 99 N·m이다. 평균체결토크는 84.2~88.04 N·m이다. 수직낙하에서 볼트에 대해 체결토크가 각각 다르고 또한 낙하 시의 미세한 각도의 차이로 인한 낙하충격량의 차이로 풀림 토크의 차이가 크다. 경사낙하시험에서 낙하충격에 의하여 타격면에 반대쪽에 있는 볼트 4와 볼트 8번의 볼트체결력의 감소는 상대적으로 적다. 평위서를 사용하여 80 N·m 정도의 체결토크를 사용하여 체결하였으므로 낙하충격이 아닌 탄성회복에 의한 풀림토크의 변화는 약 15.16 N·m이다. 뚜껑수직낙하에 의한 풀림토크의 변화가 가장 큰 48.17(63.33-15.16) N·m이며 바닥수직경사낙하에 의한 풀림토크의 변화가 가장 적은 1.63 N·m이다. 바닥수직낙하와 수평낙하의 낙하전후의 토크의 차이는 유사하지만 뚜껑수직낙하의 경우 매우 낮은 풀림토크에 의하여 볼트가 풀렸다. 뚜껑수직낙하의 경우 낙하충격에 의하여 볼트가 풀리지는 않았지만 볼트체결력이 거의 없어졌다. 경사낙하시험에서도 바닥쪽으로 수직경사낙하 또는 전단경사낙하를 실시한 경우에는 볼트체결력의 손실이 적지만 뚜껑방향으로의 수직경사낙하 또는 전단경사낙하의 경우에는 볼트체결력의 손실이 상대적으로 크다.

바닥수직낙하충격에서 Bolt 5번의 토크의 변화가 35.15 N·m로 가장 크다. Fig. 5(a)의 볼트인장력의 변화에서 Bolt 5번에 해당되는 Force 4번 힘센서에서의 1차 충격이후에 안정화된 볼트인장력이 -5 kN으로 가장 크다. 안정화된 볼트인장력이 가장 큰 뚜껑수직낙하에서 풀림토크의 가장 큰 변화를 보여준다. 풀림토크의 변화가 가장 적은 바닥수직경사낙하에서 낙하충격이후에 안정화된 값이 가장 작다. 즉 안정화된 볼트인장력의 크기가 볼트체결력과 관계가 있는 것으로 사료된다.

Table 3. 낙하충격 전후의 볼트체결토크와 볼트풀림토크

	바닥수직낙하			뚜껑수직낙하			수평낙하		
	체결토크	풀림토크	차이	체결토크	풀림토크	차이	체결토크	풀림토크	차이
Bolt 1	81.9	44.8	37.1	83	3.5	79.5	91.1	58.5	32.6
Bolt 2	82.8	48.1	34.7	84	20.6	63.4	85.6	52.2	33.4
Bolt 3	90	39.6	50.4	81.8	2.9	78.9	85.2	61.4	23.8
Bolt 4	82	75.1	6.9	84.7	46.2	38.5	86.2	59.7	26.5
Bolt 5	84.9	34.6	50.3	80.6	16.8	63.8	85.9	29.2	56.7
Bolt 6	84.4	53.1	31.3	90.5	35.2	55.3	83.5	60	23.5
Bolt 7	90	62.5	27.5	84.4	15.5	68.9	83.5	58.7	24.8
Bolt 8	89.2	63	26.2	84.6	26.3	58.3	86.2	58.3	27.9
평균	85.65	52.6	33.05	84.2	20.88	63.33	85.9	54.75	31.15

	바닥수직경사낙하			바닥전단경사낙하		
	체결토크	풀림토크	차이	체결토크	풀림토크	차이
Bolt 1	90.1	74.6	15.5	85.2	64.5	20.7
Bolt 2	94	73.1	20.9	99	80.2	18.8
Bolt 3	98.2	81.9	16.3	88.1	87.7	0.4
Bolt 4	80.5	75.2	5.3	84.5	80.1	4.4
Bolt 5	87.9	68.4	19.5	87.7	46.4	41.3
Bolt 6	80.9	59.4	21.5	88.9	64.2	24.7
Bolt 7	83.9	60.7	23.2	85.9	61.2	24.7
Bolt 8	81.6	61.6	20	85	69.5	15.5
평균	87.14	69.36	17.78	88.04	69.23	18.81

	뚜껑수직경사낙하			뚜껑전단경사낙하		
	체결토크	풀림토크	차이	체결토크	풀림토크	차이
Bolt 1	86.2	48.6	37.6	87	46.2	40.8
Bolt 2	83.2	61	22.2	89.2	48.9	40.3
Bolt 3	83	64.2	18.8	95.6	43.2	52.4
Bolt 4	88.7	81.7	7	83.3	78.2	5.1
Bolt 5	81.3	48.4	32.9	88.9	45.7	43.2
Bolt 6	89.9	60.7	29.2	82.7	59.5	23.2
Bolt 7	81.7	56.9	24.8	89.4	39.9	49.5
Bolt 8	82.7	63.1	19.6	87.2	70	17.2
평균	84.59	60.58	24.01	87.91	53.95	33.96

5. 결론

볼트체결방식의 IP-2형 운반용기에 대한 낙하시험을 실시하기 전에, 낙하방향에 따른 볼트인장력과 볼트체결력을 시험으로 평가하는 방법을 알아보기 위하여 예비시험모델을 제작하여 시험 및 평가하였다. 바닥과 뚜껑방향의 수직낙하, 수평낙하, 4방향의 경사낙하 등 총 7가지 낙하방향으로

자유낙하를 실시하였다. 볼트인장력의 변화를 힘센서를 통하여 측정하여 보았다. 그 결과 순간적인 동적 볼트인장력의 변화가 측정이 가능하였고 뚜껑수직낙하시험에서 최대 볼트인장력의 증가인 18.5 kN을 보였으며 24.3 kN의 최대 볼트인장력의 감소를 보였다. 낙하충격의 전·후에 측정된 체결토크와 풀림토크의 차이가 낙하충격에 의한 볼트 체결력의 차이에 체결시의 볼트체결토크와 볼트풀림토크의 차이를 포함한다. 그러므로 낙하충격에 의한 볼트체결력의 차이는 볼트 체결에 따른 토크의 차이를 고려하여야 한다. 뚜껑수직낙하에 의한 풀림토크의 변화가 가장 큰 48.17 N·m이며 바닥수직경사낙하에 의한 풀림토크의 변화가 가장 적은 1.63 N·m이다.

참 고 문 헌

1. KOREA MOST Act. 2001-23, "Regulations for the Safe Transport of RadioactiveMaterial", (2001).
2. IAEA Safety standard Series No. TS-R-1, "Regulations for Packaging and Transportation of Radioactive Material", (2005)
3. U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, "Packaging and Transportation of Radioactive Material", (2004).
4. 서기석 외, "방사성폐기물 운반용기 구조 및 열 안전성평가 - 1차년도 중간보고서", (2005).