

Safety Assessment of Aircraft Crash Accident Into Spent Nuclear Fuel Dry Storage Facility – A Review With Focus on Structural Evaluation

사용후핵연료 건식저장시설의 항공기 충돌 구조안전성평가 연구 현황

Sanghoon Lee

Keimyung University, 1095, Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu, Republic of Korea

이상훈

계명대학교, 대구광역시 달서구 달구벌대로 1095

(Received March 20, 2019 / Revised May 14, 2019 / Approved June 4, 2019)

Since the 1970s, aircraft crash accidents have been considered as one of the severest external events that should be evaluated for license application of nuclear reactors. After the 9.11 terrorist attacks, many countries have performed safety assessment against intentional or targeted aircraft crashes into nuclear related facilities. In some countries, assessment against targeted aircraft crash was enforced by regulation and considered an important task for license approval. Safety assessment against aircraft crash is a technically difficult task and many countries manage R&D programs to improve its reliability. In this paper, regulations of many countries regarding safety assessment against aircraft crash are summarized, separating regulations for accident aircraft crash and those for targeted aircraft crash. Research performed in various countries on safety assessment of nuclear facility against aircraft crash are summarized, with a focus on spent nuclear fuel dry storage facilities.

Keywords: Spent nuclear fuel, Dry storage, Aircraft crash, Safety assessment, High speed impact

* Corresponding Author.

Sanghoon Lee, Keimyung University, E-mail: shlee1222@kmu.ac.kr, Tel: +82-53-580-5264

ORCID

Sanghoon Lee <http://orcid.org/0000-0003-0806-4554>

항공기 충돌사고는 1970년대부터 원자력발전소의 인허가에 중요하게 고려되어 온 외부 사건의 하나였다. 9.11 테러 이후 세계 각국에서는 사고로 인한 항공기 충돌에 더하여 의도된 항공기 충돌에 대비한 안전성 평가를 수행해오고 있으며 일부 국가에서는 이를 법제화하여 인허가의 중요한 요건으로 다루고 있다. 항공기 충돌에 대한 안전성 평가는 여러가지 요인으로 인하여 쉽지 않은 작업이며 보다 신뢰성 있는 평가를 위한 연구개발이 세계 각국에서 진행 중이다. 본 논문에서는 각국의 항공기 충돌에 대비한 안전성 평가 요건의 법제화 현황을 사고로 인한 충돌과 의도된 충돌의 경우로 분리하여 정리하였다. 다양한 조건의 항공기 충돌에 대한 안전성 평가를 위하여 수행되어 온 연구 중 주요한 것들을 정리하였으며 특히 사용후핵연료 건식저장시설에 대한 내용을 위주로 다루었다.

중심단어: 사용후핵연료, 건식저장, 항공기 충돌, 안전성 평가, 고속충돌

1. 서론

핵주기시설의 안전은 시설에서 저장, 처리되는 핵물질로부터 발생하는 방사선의 해로운 영향으로부터 사람과 환경을 보호하는 것이 목적이며 이를 달성하기 위하여 사람의 방사선 피폭이나 핵물질의 외부 환경으로의 유출을 막기 위한 방안, 방사선적 위해를 야기할 수 있는 사고의 방지를 위한 방안, 그런 사고가 발생하였을 때 그 영향을 최소화하기 위한 방안을 마련, 제시해야한다[1]. 이러한 안전의 원칙은 핵주기시설의 입지선정, 설계, 인허가, 건설, 운영, 제염해체 등 전 생애주기(life cycle)에 걸쳐서 지켜져야 한다. 핵주기시설의 안전성 평가에 고려되는 외적 사고(external event) 중 항공기 충돌은 원자력발전소를 운영하는 국가에서 1970년대부터 중요하게 고려해온 사고로서 사용후핵연료 저장시설과 같은 원자력 관계시설의 안전을 위협하는 가장 가혹한 사고 중 하나로 인식되어 왔다. 문헌에 공개되어 있는 항공기 충돌 관련 요건들은 주로 원자력발전소에 적용되는 것인데 대부분의 국가에서 항공기 충돌을 원전의 입지선정 시에 고려하고 있으며 일부 국가는 원전 격납건물 등의 설계 시 설계기준사고(design basis accident)로도 고려하고 있다. 이 경우에는 경비행기나 소형 군용기의 충돌이 고려대상이 되었으며 대형 민항기의 충돌은 설계단계에서 고려되지는 않았었는데, 이는 공항의 위치 및 항공기 운항경로를 고려하여 대형민항기가 시설에 충돌할 확률이 극히 낮도록 원자력발전소의 입지를 선정하고 설계기준사고에서 대형민항기의 충돌은 제외하는 확률론적 접근방식을 취해온 탓이다. 미국 DOE에서 발간한 보고서 “Accident analysis for aircraft crash into hazardous

facilities” [2]는 핵주기시설을 비롯한 유해물질을 취급하는 시설에 항공기가 충돌하였을 때의 영향을 평가하는 체계적인 방안을 제시하고 있는데, 이 보고서에서는 항공기가 충돌할 확률이 연간 10^{-7} 보다 작은 경우에는 시설의 손상평가, 유해물질의 누출평가 등을 수행할 필요가 없다고 기술하고 있다.

위와 같은 확률론적 접근방식의 한계를 노출시킨 사건이 바로 2001년에 발생한 9.11 테러사건이었다. 9.11 테러 이후로 대형민항기가 공중에서 납치되어 원자력 관계시설에 의도적으로 충돌할 수 있다는 시나리오는 원자력발전소를 운영하고 있는 모든 국가에서 공통적으로 인지된 현실적 위협이 되었으며 아무리 위험도(risk)가 큰 사건이라도 그 발생 확률이 충분히 낮으면 별도의 대처를 하지 않아도 된다는 접근 방식에 대해 재고하게 되었다. 9.11 테러 이후 원자력 선진국들은 자국의 원자력 시설을 대상으로 의도된 항공기 충돌에 대한 추가적 안전성 평가를 수행하는 등 보완조치를 취해왔으며 이러한 노력에는 평가 기술의 개발, 관련 규제 기술의 개발 및 법제화, 항공기 충돌 저항성을 높인 시스템의 개발 등이 포함된다.

현재 의도된 항공기 충돌 평가와 관련하여 공개되어 있는 대부분의 문건은 원자력발전소에 대한 것이며 극히 일부 사용후핵연료 중간저장시설에 대한 내용이 공개되어 있다. 본 논문에서는 사용후핵연료 건식저장시설을 중심으로 원자력 관련 시설에 대한 항공기 충돌사고에 대비한 법제화 및 안전성 평가, 기술개발 현황을 정리한다. 사고로 인한 항공기 충돌(accidental aircraft crash)과 의도된 항공기 충돌(targeted aircraft crash)을 모두 다루나 후자에 초점을 두고 기술하고자 한다. 의도된 항공기 충돌의 경우 안전(safety)과

보안(security) 모두 관계된 사안으로 심층방호(defence-in-depth)의 개념을 통하여 대처하는 것이 타당할 수도 있으나, 본 보고서에서는 안전 측면에서의 내용 위주로 기술한다. 본 보고서의 2장에는 항공기 충돌 대비 각국의 법제화 현황을 미국의 사례를 중심으로 살펴봄과 3장에는 실제 이루어진 평가 내용 및 관련 연구개발 내용을 기술한다.

2. 항공기 충돌 안전성 평가 관련 법제화 현황

2.1 항공기 충돌 사고(incident) 관련 법제화 현황

사고에 의한 항공기 충돌은 발생 빈도가 극히 낮은 사건이기 때문에 과거에는 항공기 충돌 안전성평가를 확률론적 안전성평가(probabilistic safety assessment)의 틀 안에서 수행하는 경우가 많았다. 미국에서는 항공기가 충돌하는 경우를 크게 시설 주변의 공항에서 항공기가 이착륙하는 도중에 추락하는 경우와 시설 주변의 공항에서의 추락하는 두 가지 경우로 크게 나누어, 각각의 사건이 발생할 빈도 및 기종에 대한 정보로부터 시설에서 유해한 물질이 주변에 위협 수준 이상으로 유출될 확률을 계산하였다[2]. 원전의 입지 및 설계의 경우 항공기 충돌로 인한 방사능 재해가 발생할 확률이 10^{-7} 년 보다 작으면 해당 원전은 항공기 충돌에 의한 위험 요소가 실질적으로 없는 것으로 간주하여 항공기 충돌을 충분히 기피할 수 있는 입지에 있는 원전의 설계기준(design basis)에 항공기 충돌을 포함하지 않았다[3, 4].

US NRC에서 발간된 NUREG-0800 [4]의 3.5.1.6절 "Aircraft Hazard"에 상기 내용이 잘 기술되어 있다. 상기 문헌은 항공기 충돌로 인하여 10CFR100 (발전용 원자로의 부지에 관한 기준)이 제시하고 있는 방사선 노출과 관련된 지침(exposure guideline)에 따른 방사선적 재해의 발생확률이 연간 10^{-7} 보다 작으면 해당 부지는 10CFR100이 제시하고 있는 원전 부지기준을 만족시키는 것으로 보며, 아래의 세 가지 조건이 만족되면 해당 부지에서 항공기 충돌로 인한 방사선적 재해의 발생확률이 연간 10^{-7} 보다 작다고 볼 수 있다고 기술하고 있다.

- 부지에서 공항까지의 거리 D가 5~10 법정마일(statute mile = 1,609.3 m)이고 연간 운항횟수가 $500D^2$ 보다

작거나, 공항까지의 거리가 10 법정마일 이상이고 연간 운항횟수가 $1000D^2$ 보다 작은 경우

- 부지가 저공훈련항로(low-level training routes)를 포함한 가장 가까운 군용항로에서 최소 5 법정마일 이상 떨어져 있는 경우, 단 연간 1000회 이상 운항이 이루어지거나 운항 횟수와 상관없이 폭격연습과 같이 위험성이 큰 활동이 이루어지는 경우는 예외
- 부지가 연방항로(Federal airway) 및 대기 선회 비행경로(holding pattern), 착륙 대기 선회 비행경로(approach pattern)에서 최소 2 법정마일 이상 떨어져 있는 경우

상기 비행 운항횟수는 연간 가능한 최대값을 선정해야 하며, 만약 위의 세 조건을 만족시키지 못하는 부지의 경우 보다 상세한 항공기 충돌 관련 위험도(hazard) 평가를 수행해야 하며 부지 기술기준이 제시한 기준을 초과한 방사선적 위험이 발생할 가능성이 연간 10^{-7} 이상인 경우 항공기 충돌을 설계기준에 반영하여야 한다. 이때는 10CFR50 부록 A의 General Design Criterion 4 (GDC 4)가 적용되어야 한다. GDC 4는 시설 안전에 중요한 SSC (System, Structure and Components)는 반드시 외부 비행체 혹은 비산물의 충돌로부터 적절히 보호되어야 할 것을 요구하고 있다. 항공기 충돌로 인한 방사선적 위험도의 상세한 계산 절차는 [2]의 5.2절에 상세히 기술되어 있다.

미국을 제외한 다른 국가의 현황은 J.D.Stevenson의 "SURVEY OF EXTREME LOAD DESIGN REGULATORY AGENCY LICENSING REQUIREMENTS FOR NUCLEAR POWER PLANTS" [5] 등에 잘 정리되어 있다. 일본과 캐나다의 경우 사고에 의한 항공기 충돌 관련 법규는 미국의 법규를 그대로 준용하고 있다. 독일은 무게가 약 20톤 정도 되는 Starfighter 급의 군용기가 $800 \text{ km}\cdot\text{hr}^{-1}$ (= $222 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)의 속도로 충돌하는 사고를 설계기준으로 고려하고 있다. 프랑스는 모든 원전의 안전등급 구조물의 설계에 경비행기 Cessna의 충돌을 고려하고 있으며 공항과의 근접도에 따라 민항기 (Lear jet 23, Boeing 720)와의 충돌을 고려하기도 한다. 충돌 속도는 $360 \text{ km}\cdot\text{hr}^{-1}$ (= $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)를 고려한다. 단, 민항기의 충돌은 격납건물의 설계에만 고려되는 사항이다. 스위스의 경우 독일과 마찬가지로 항공기의 충돌이 원전의 설계기준으로 고려된다. 대상이 되는 항공기는 무게 90톤의 B707-320이며 충돌속도는 $370 \text{ mile}\cdot\text{hr}^{-1}$ (= $165 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)이다. 벨기에의

경우도 독일, 스위스와 비슷한 상황으로 100톤 규모의 항공기가 $300 \text{ km}\cdot\text{hr}^{-1}$ ($= 83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)의 속도로 충돌하는 것을 원전의 설계기준으로 고려하고 있다. 스웨덴의 경우 가변적이기는 하나 엔진무게가 약 0.1톤에서 0.3톤 정도, 총중량이 약 5.7톤 정도의 소형비행기의 충돌을 고려하고 있으며 충돌속도는 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 $112 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 범위를 고려한다. 우리나라의 경우 미국의 접근법과 같은 방식을 채택하고 있으며 항공기 충돌 평가에 대한 요건은 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(원자력안전위원회규칙 제17호) 및 관련 고시(원자력안전위원회 고시 제2015-019호)에 제시되어 있다.

2.2 의도적인 항공기 충돌(targeted aircraft crash) 관련 법제화 현황

2001년 9월 11일 미국 뉴욕의 World Trade Center를 대상으로 발생한 테러사건은 전 세계적으로 국가 주요시설에 대한 항공기 테러에 대한 우려를 증가시켰다. 9.11 테러사건 이후 원전을 비롯한 원자력관계시설의 안전성이 주요 사회적 현안으로 대두되었으며 원전의 항공기 충돌 대처 설계의 여부는 해당 원전의 안전수준 평가의 주요인자로 고려되기 시작하였다. 이에 따라 원전 시설물의 의도된 항공기 충돌 대처 설계는 국제적인 추세가 되었다.

미국은 2009년 7월 관련 요건을 제정, 공표하여 신규 원전의 인허가 및 가동 원전의 인허가 갱신에 적용하고 있다. 프랑스는 2010년 7월 7일 발표된 ASN Committee 성명에서 9.11 사태의 경험을 반영하지 않은 원전의 자국 내 건설을 허용하지 않겠다고 발표하였다. 핀란드는 2008년 11월 신규원전 건설 시 9.11 사태의 경험을 반영하도록 규제입장을 수립하였다(Government Decree on the Safety of NPPs). 영국의 규제기관인 HSE (Health and Safety Executive)는 2006년 안전성 평가원칙에서 항공기 충돌을 외부사건으로 고려해야 한다고 명시하였다. 독일, 일본 및 중국은 아직 별도의 요건을 만들지 않은 것으로 판단된다. 다만, 명시적으로 법제화가 되어있지 않다고 해서 이들 국가의 인허가 기관이 의도적 항공기 충돌과 관련된 요건을 가지고 있지 않다는 의미는 아님에 유의해야 한다. 이와 같은 외국의 사례 중 미국의 사례에 대하여 좀 더 자세히 살펴보도록 한다.

9.11 테러발생 이후 꾸준히 원전의 대형항공기 충돌 안전성에 대한 논란이 계속되던 중 NRC는 2007년 신규 인허가

대상 원전에 대형민항기의 충돌 영향 평가를 강제하는 법규를 도입할 것을 제안하였다. 하지만 이 법규는 대형민항기의 충돌을 설계기준사고(design basis event)에 포함시키려는 의도가 아니라 조금 더 큰 안전여유를 부여하도록 하는 데 초점을 맞춘 법규였다. 또한 과거에 이미 인허가를 받은 원전 설계에 대해서는 적용하지 않도록 하였다. 하지만 웨스팅하우스는 2007년 5월 기준에 인허가를 득한 AP1000 원전의 설계에 SC 콘크리트를 적용하여 항공기 충돌 시 관통저항성을 크게 향상시킨 새로운 설계를 NRC에 제출하기도 하였다. 2009년 6월 NRC는 과거에 인허가를 득한 설계를 사용하는 신규원전에도 대형민항기의 충돌 평가를 강제하도록 법규를 수정하여 최종 공표하였다. 해당 법령은 10CFR50.150에 실렸으며 자세한 내용은 다음과 같다.

-
- (a) Assessment requirements. (1) Assessment. Each applicant listed in paragraph (a) (3) shall perform a design-specific assessment of the effects on the facility of the impact of a large, commercial aircraft. Using realistic analyses, the applicant shall identify and incorporate into the design those design features and functional capabilities to show that, with reduced use of operator actions:
- (i) The reactor core remains cooled, or the containment remains intact; and
 - (ii) Spent fuel cooling or spent fuel pool integrity is maintained.
- (2) Aircraft impact characteristics. 1 The assessment must be based on the beyond-design-basis impact of a large, commercial aircraft used for long distance flights in the United States, with aviation fuel loading typically used in such flights, and an impact speed and angle of impact considering the ability of both experienced and inexperienced pilots to control large, commercial aircraft at the low altitude representative of a nuclear power plant's low profile.
-

한편 NRC는 기존 원전에 대형민항기의 충돌에 대비하여 설계 보강을 강제하게 하는 대신 항공기 충돌 등으로

인하여 발생할 수 있는 화재 및 폭발의 영향을 완화하기 위한 방안을 마련하도록 2002년에 법규를 제정하였다. 해당 법규는 10CFR73의 보안관련 법규에 포함되었다가 2008년 10CFR50.54 (hh)의 항목으로 최종 발간되었다. 구체적인 내용은 다음과 같다.

(2) Each licensee shall develop and implement guidance and strategies intended to maintain or restore core cooling, containment, and spent fuel pool cooling capabilities under the circumstances associated with loss of large areas of the plant due to explosions or fire, to include strategies in the following areas:

- (i) Fire fighting;
 - (ii) Operations to mitigate fuel damage; and
 - (iii) Actions to minimize radiological release.
-

이상과 같이 기술된 10CFR50.150 및 10CFR50.54 (hh)가 대형민항기의 의도된 충돌에 대비하도록 하는 미국의 주요 법규이며 현재까지는 미국의 법규가 가장 구체적으로 법제화되어 있는 상황이다.

3. 항공기 충돌 안전성평가 기술개발 현황

3.1 항공기 충돌 평가의 기술적 어려움

항공기의 충돌은 매우 큰 에너지를 가지는 비행체의 충돌이라고 간주할 수 있다. 공학 해석을 통한 항공기 충돌 안전성평가의 어려운 점은 1) 충돌하는 대상(항공기) 자체가 매우 복잡한 시스템이라 공학적 모델링이 난이하며 2) 매우 높은 에너지를 가진 충돌로서 폭발, 화재, 구조손상 등 다양한 물리적 현상이 매우 짧은 시간에 동시다발적으로 발생하며 3) 보편타당한 충돌조건을 선정하는 것이 어려우며 4) 원형모델에 대하여 시험을 수행하여 해석평가의 타당성을 검증(verification and validation: V&V)하는 것이 현실적으로 거의 불가능하다는 점 등이 있다. 이상과 같은 이유로 1960년대 이래로 항공기의 충돌을 단순화하여 모사하는 방법, 항공기의 충돌로 발생하는 물리적 현상을 개별적으로

고려하여 안전성평가에 활용하는 방안 등이 연구되어 왔다. 근래에는 해석기법과 컴퓨터의 진보로 보다 세밀한 모델 및 해석기법으로 상대적으로 정확한 평가가 가능해져 원전 및 사용후핵연료 수송/저장시스템 등의 안전성평가에 활용이 되고 있는 실정이다. 하지만 여전히 항공기 충돌로 야기되는 복잡한 여러 현상을 단순화 없이 모사하는 것은 불가능한 실정이다. 구조손상평가를 일례로 들면 항공기의 충돌은 매우 높은 에너지를 가진 충돌로서 이로 인한 구조손상은 연속체 역학(continuum mechanics)으로 모사가 가능한 범주를 벗어나는 경우가 대부분이다. 파괴역학에 기반하여 이러한 경우의 해석도 수행이 가능하나 그 해석 결과의 불확실성이 상대적으로 커서 안전성평가에 활용하는 경우에는 주의가 필요하다. 이에 현재까지도 항공기 충돌로 인한 국부손상의 평가에는 시험에 기반한 경험식이 설계에 활용되고 있는 실정이다. 또한 항공기 충돌로 인해 발생하는 화재, 폭발 등의 현상을 시뮬레이션 하는 것도 현실적으로 쉽지 않은 실정이다. 그러므로 해석을 통한 항공기 충돌 안전성평가를 위해서는 복잡한 물리적 현상을 단순화하여 필요한 정보를 적절한 정확도를 가지고 도출해 내는 것이 필수적이며 이때 도입된 가정의 타당성과 보수성을 유지하는 것이 가장 중요한 것이라고 할 수 있다.

항공기 충돌 평가를 수행하는데 있어서 가장 큰 어려움 중 하나는 상세한 항공기 해석모델을 작성하는 것의 어려움이다. 항공기, 특히 대형민항기의 경우 그 설계 자료가 개발사 혹은 운영사의 지적 자산으로 엄밀히 보호되고 있기 때문에 해석모델 작성을 위한 도면을 입수하는 것이 현실적으로 불가능하다. 이에, 대상이 되는 항공기의 충돌 평가를 위한 타당성 있는 모델을 작성하는 것이 매우 어려우며 해외에서는 폐기된 항공기를 조사해서 모델을 만들어내는 사례까지 알려져 있는 실정이다. 이에 많은 국가에서 실제 항공기 대신 Riera 함수라고 하는 시간에 따른 충격력 함수로 항공기를 대체해서 평가를 하고 있으며 이에 대한 자세한 이야기는 다음 절에 설명한다.

3.2 Riera의 충격력 이력함수

1967년 J.D.Riera [6, 7]는 Boeing 707-320, Boeing 720 등의 항공기가 완전히 고정된 강체로 모사된 방벽에 수직으로 충돌하였을 때 방벽에 가해지는 충격력의 시간이력률

이론적인 방법으로 계산하였다. 이 계산에는 항공기의 길이 방향 질량분포의 정보와 항공기 동체의 좌굴하중의 정보가 사용되었고 이렇게 계산된 하중이력을 활용하여 원자로 격납건물에 항공기 충돌로 발생하는 응력분포를 계산해내었다. 이 연구를 통하여 Riera는 충돌하는 항공기에 대한 해석과 충돌 대상에 대한 해석을 분리(decouple)하는 계산 기법을 제안하고 있으며 이를 통하여 문제를 크게 단순화할 수 있게 되었다. 강체에 충돌하는 상황을 산정하여 계산된 충격력은 강체가 아닌 대상과의 충돌에서 실제 작용하는 힘보다 보수적으로 크게 계산되므로 타당한 가정이라고 할 수 있다. Riera의 계산방법은 추후 다른 연구자들에 의해 많이 개선되어 왔으며 최근까지 항공기 충돌 안전성평가에 중요하게 활용되는 방법이다.

구체적으로, Riera는 항공기 충돌로 인하여 강체벽에 가해지는 충격력 $P(t)$ 는 다음과 같이 계산된다고 보았다.

$$P(t) = P_b[x(t)] + \mu[x(t)] \cdot v^2(t) \quad (1)$$

여기서

$x(t) = \int_0^t v(\xi) d\xi$: 비행기 선단으로부터의 거리

$P_b(x)$: 동체를 변형, 파괴시키는데 필요한 힘

$\mu(x)$: 항공기의 단위길이 당 질량

$v(t)$: 파괴되지 않은 항공기의 속도이다.

이 식에 의하면 강체벽에 전달되는 충격력은 충돌로 인하여 파손(crush), 변형(deform) 혹은 좌굴(buckle)되는 미소절단면이 가하는 변형력과 관성력의 합이다. Riera의 논문에서는 Boeing 707-320의 P_b , μ 의 데이터 및 이 데이터들을 상기 식에 입력 후 시간에 대하여 적분하여 충격력 이력함수를 계산하고 있다.

실제 구조물에 Riera 함수를 적용하여 구조물의 응답, 손상을 구하기 위해서 추가적으로 필요한 데이터가 있는데 항공기 충돌로 인하여 실제 힘이 가해지는 영역(effective crush area)의 면적과 형상이다. Riera는 가변적인 충돌영역의 면적을 일정한 상수로 가정하여 원전 격납건물의 응력해석에 사용하였다.

일반적으로 비행체에 의한 충돌로 인한 구조손상은 국부손상(local damage)과 전반손상(global damage)로 분류하는데 Riera의 방법은 항공기를 변형이 가능한 충돌체

(deformable missile)로 고려한 전반손상 해석방법이라고 볼 수 있다. 근래엔 Riera 함수와 유한요소법의 요소제거법(element erosion)을 이용하여 국부손상을 평가하는 기법에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 근래에는 수계산이 아니라 매우 세밀한 항공기 모형을 가지고 전산해석을 수행하여 Riera 함수를 도출하는 시도가 이루어지고 있다. Riera 함수를 활용함으로써 첫째 항공기의 설계데이터가 노출될 만큼 세밀한 정보 없이 항공기 모델을 대체할 수 있는 함수를 도출할 수 있으며, 둘째 항공기 충돌의 강도, 혹은 가혹성(severity)을 정량적으로 평가할 수 있는 척도를 가질 수 있다는 장점이 있다.

3.3 원형규모 F4 Phantom 충돌시험

1988년 4월 19일 미국의 SNL (Sandia National Lab)은 원형규모(full-scale)의 F4 Phantom 제트기를 $210 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 속도로 콘크리트 방벽에 충돌시키는 시험을 수행하였다. 이 시험은 일본의 Kobori Research Complex (당시 Muto Institute of Structural Mechanics)의 의뢰로 수행된 것으로서 항공기가 강체에 가까운 방벽에 충돌할 때 실제 발생하는 충격력 및 충격영역을 시험적으로 측정, 검증하기 위하여 수행되었다. 이 시험의 세팅 및 시험결과, Riera 해석식과의 비교는 [8]에서 찾아볼 수 있다. 이 시험에서 콘크리트 방벽의 국부손상 여부는 항공기의 충격영역을 도출하는데 활용되었고 국부손상의 평가가 주목적이지 아니었다. 이 시험의 목적은 전반해석에 필요한 자료의 수집 및 검증이라고 할 수 있다. 이 시험을 통하여 검증하고자 한 것은 앞 절에서 소개한 Riera 기법을 이용한 F4 phantom의 모델링의 타당성이며 이와 더불어 실제로 충격력이 가해지는 유효충돌영역(effective impact area 혹은 effective crush area)이다. 이와 같이 어떤 항공기 종의 “검증된” Riera 함수가 있고 이 하중이 가해지는 영역의 정보가 주어졌다면 해당 기종에 대한 항공기 충돌 평가는 별도의 항공기 해석 모델이 없이도 가능하다. 따라서, 항공기 충돌 안전성 평가에 필요한 적절한 Riera 함수를 구하는 것은 항공기 충돌 안전성 평가에 있어서 매우 중요한 작업이라고 할 수 있다.

이 시험에서는 매우 두꺼운 콘크리트 방벽이 강체벽을 모사하되 매우 강한 충격력을 직접 측정하기 어려우므로 방벽을 공기베어링으로 지지하여 가속을 받을 수 있도록



(a) Impacting moment of F4-Phantom



(b) Image of damaged concrete block

Fig. 1. F4-Phantom full scale crash test [8].

세팅하였고, 이 가속도에 방벽의 무게를 곱하여 충격력을 계산하였다. 이 충격력을 충돌 항공기에 장착된 가속도계로부터 측정된 신호로부터 계산된 항공기가 받은 충격력과 비교하여 시험 데이터의 타당성을 확보하였다. 그 후, Riera 기법으로 계산된 충격력과 시험으로 구해진 충격력을 비교 평가하였는데, 결론은 Riera 기법이 시험 대상 항공기의 충돌특성을 적절히 모사할 수 있다는 것이었다.

Fig. 1은 시험 현장 모습과 충돌 후의 방벽의 모습이다. 방벽의 손상영역으로부터 계산된 F4 Phantom의 유효충돌영역은 대략 동체 단면적의 2배 정도로 측정되었다.

3.4 F4 Phantom의 엔진 충돌실험

SNL과 일본 Kobori의 연구진은 앞 절의 F4 Phantom의 충돌시험과 더불어 비교적 밀도가 높지만 변형가능한 충돌체(deformable missile)로 간주할 여지가 있는 F4 Phantom의 GE-J79 엔진의 충돌시험을 수행하였다[9, 10]. 이 시험의 목적은 엔진에 의한 콘크리트 방벽의 천공(perforation), 관통(penetration), 배면파쇄(scabbing) 등과 같은 국부손상을 평가하기 위한 것으로 엔진을 모사할 수 있는 세 가지 스케일(small, intermediate, large)의 충돌체를 설계하여 시험에 활용하였고 비교평가를 위하여 각각의 스케일에 대응하는 강체 충돌체(rigid missile) 및 실제 F4 Phantom에 사용되는 GE-J79엔진을 사용하여 시험을 수행하였다. 시험의 세팅과 결과는 [9, 10]에서 찾아볼 수 있다. 3.3절의 시험이 항공기 충돌로 인하여 야기되는 충격력이라는 전만 거동에

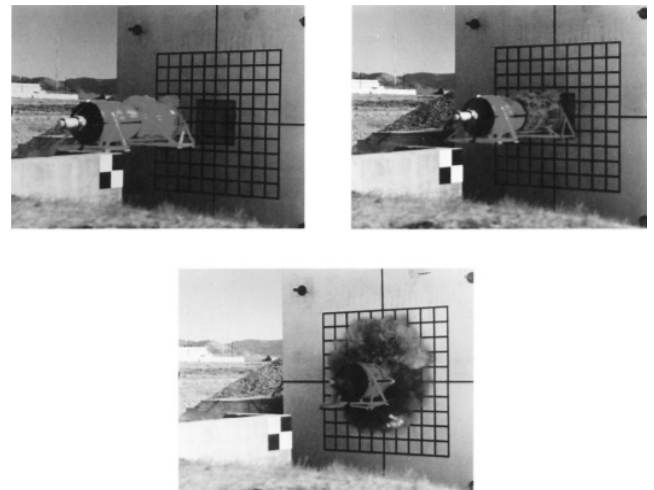
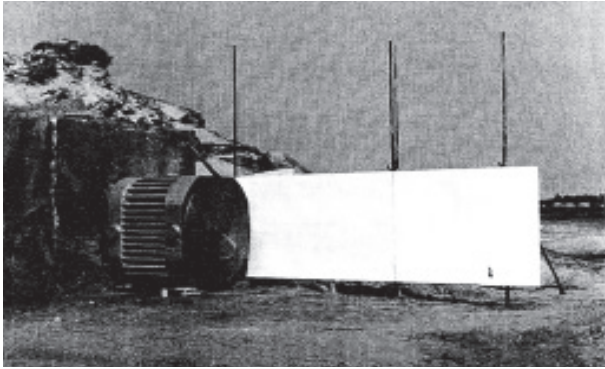


Fig. 2. Full scale crash test of GE-J79 engine performed by SNL [9].

중요한 특성 평가를 위한 것인 반면 이 시험의 목적은 순수하게 충돌로 인한 콘크리트 방벽의 국부손상 평가를 위한 것이다. 특히, 이 연구의 초점은 첫째, 콘크리트 방벽의 국부손상 평가에 유사성(similarity) 원리를 적용할 수 있는지의 여부 파악, 둘째 항공기 엔진이 이론적인 강체 충돌체와 얼마나 다른 결과를 주는지의 평가였다. 실제 시험은 세 기관이 각각 나누어 수행하였다. 작은 스케일(small scale) 시험은 일본의 Kobori 연구소에서, 중간 스케일(intermediate scale) 시험은 일본의 CRIEPI (Central Research Institute for Electric Power Institutes)에서, 원형규모 및 큰 스케일(large scale) 시험은 SNL에서 수행하였다(Fig. 2).



(a) Before test



(b) After test

Fig. 3. Missile impact test of CASTOR II cask.

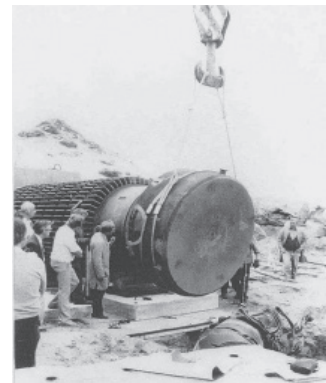
콘크리트 방벽에 비행물이 충돌하였을 때 손상을 평가하는 연구는 국방 분야를 중심으로 매우 활발히 이루어진 연구이나, 항공기에서 가장 단단한 부품으로 여겨지는 엔진을 대상으로 하여 국부손상 평가모델의 타당성을 검증한 시도는 이 연구가 가장 대표적이라 할 수 있다. [2]에서도 콘크리트 구조의 국부손상 평가에 본 연구의 내용을 반영하여 지침을 제시하고 있다.

매우 치밀한 계획으로 수행된 이 시험의 결론은 다음과 같다.

- 세 가지 스케일로 시험을 수행한 결과 콘크리트 방벽의 국부손상 평가에 상사성 원리를 적용하는 것이 큰 무리가 없는 것으로 보이며 축소스케일을 사용하는 경우 실제보다 보수적인 평가가 이루어진다.
- 시험결과로 보았을 때 콘크리트 국부손상 평가에 사용되는 모델 중 가장 좋은 정확도를 주는 것은 관통깊이(perforation depth) 예측에는 Degen, Chang, CEA-EDF, CRIEPI 공식이, 배면파쇄 예측에는 Chang, Bechtel, CRIEPI 공식이 정확한 것으로 판단되었다[2].
- 관통깊이는 변형가능한 충돌체의 경우 강체 충돌체의 결과에 약 0.65를 곱한 정도의 결과가 얻어진다. 배면파쇄의 경우 0.6 정도의 감소계수가 적당하다.
- 콘크리트 패널의 후면에 철판으로 보강을 하는 경우 관통과 스캐빙 저항성을 크게 높임을 확인하였다.
- 관통 후 충돌체의 잔류속도는 Kar의 공식[2]이 정확히 예측함을 확인하였다.



(a) After side impact



(b) After lid impact

Fig. 4. Missile impact test of TN-1300 Cask [11].

3.5 독일 CASTOR cask의 비행체 충돌시험

독일의 GfN (Gesellschaft für Nuklear) 및 BAM (Bundesanstalt für Materialforschung) 연구소에서는 1978년에서 1980년까지 수년간 사용후핵연료 운반용기의 비행체 충돌시험을 수행하였다. 독일은 예전부터 전투기의 충돌을 원자력발전소의 설계기준사고로 고려하였으며 이것은 중간저장시설의 인허가에도 동일하게 적용되었다. 시험에는 군용항공기의 엔진을 모사하는 단순화된 충돌체가 설계되어 사용되었다. 충돌체의 직경은 600 mm, 무게는 1000 kg이며 5 mm의 셸 구조물과 파이프가 제작에 사용되었다. CASTOR II, TN 1300 등 사용후핵연료 운반용기의 실물크기 모델이 제작되었고 이 원형크기 용기 모델에 충돌체가 300 m·s⁻¹의

속도로 여러 가지 다른 각도에서 충돌하는 시험이 수행되었다(Fig. 3-4). 이 시험을 통하여 각 용기의 주격납구조(primary containment structure)의 건전성이 유지되는지 시험적으로 검증하였고 전산해석을 위한 충격력의 시간 이력 자료를 생산하였다. 추후 해당 충격력 시간이력을 입력으로 하여 전산해석을 수행, 시험결과와 비교검증을 하였다[11]. 시험결과, 가장 가혹한 조건으로 여겨진 충돌체가 뚜껑에 수직으로 충돌하는 사고의 경우에도 매우 작은 변형만 발생하고 캐스크의 건전성을 저해하는 징후가 발견되지 않았다.

3.6 독일 중간저장시설 항공기 충돌 관련 연구

독일의 사용후핵연료 중간저장시설의 항공기 충돌 안전성평가와 관련된 내용은 [12]에서 찾아볼 수 있다. 독일의 사용후핵연료 중간저장시설에는 대표적인 두 가지 타입이 있는데 STEAG 개념과 WTI 개념이다.

- STEAG : 이 설계는 독일 에센지역의 STEAG라는 회사에서 개발한 개념으로 두께 1.2 m의 벽과 두께 1.3 m의 지붕으로 구성된 콘크리트 일체형 건물이다. 이 개념이 적용된 시설로는 Brokdorf, Krümmel, Brunsbüttel, Grohnde, Lingen and Unterweser 등이 있다.
- WTI : 이 설계는 Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH, Jülich라는 회사에서 개발하였으며 중앙집중식 저장시설인 Ahaus, Goreleben의 시설과 유사한 개념이라 할 수 있다. 0.75 m에서 0.8 m 두께의 콘크리트 벽과 0.55 m 두께의 지붕을 가지고 있으며 두 개의 저장 구역이 벽으로 분리되어 있다. WTI 개념은 Biblis, Philippsburg, Grafenrheinfeld, Isar and Gundremmingen 등의 사이트에 적용되었다.

이 연구에서는 9.11 테러사건 이후 관심사가 된 의도된 항공기 충돌을 고려하였으며 구체적으로는 다음과 같은 연구가 진행되었다.

- 항공기 충돌 시나리오 분석, 화재 시나리오 분석, load cases 분석
- 항공기 충돌로 인한 저장건물의 구조적, 열적 손상 평가

- 항공기 충돌로 인한 저장 캐스크의 구조적, 열적 손상 평가
- 방사선 유출로 인한 영향(consequence) 평가

상기와 같은 평가에서 시설이 갖추어야 할 안전요건은 어떠한 경우에도 대중의 방사선 피폭이 100 mSv보다 크지 않아야 한다는 것이었다. 각각의 평가에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다. 항공기 충돌 시나리오에서는 독일에서 운행되는 대형민항기의 큰 부분을 차지하는 Boeing 747-400과 Airbus 340-600이 고려되었으며 두 기종 모두 항공유를 가득 채운 상태로 충돌하는 시나리오를 고려하였다. 항공기 충돌 속도를 산출하기 위하여 모의비행시뮬레이터를 활용하였으며 숙련된 조종사에게 컨설팅을 하였다. 평가에 고려된 충돌 위치에 실제로 항공기를 고의로 충돌시키는 것은 매우 힘들다는 결론을 내렸으며 따라서 해석평가에 고려된 충돌 위치가 충분한 보수성을 가지고 있다고 결론짓고 있다.

건물에 항공기가 충돌하였을 때 벽체가 이 충격을 모두 흡수할 수 있는지의 여부를 해석적으로 평가하였고 그렇지 못한 경우 잔류 에너지로 인한 비산물의 영향을 고려하였다. 항공유가 건물로 유입이 되는지의 여부를 평가한 후 이 항공유로 인한 화재가 건물 및 캐스크에 미치는 영향을 해석적으로 평가하였다. STEAG 건물의 경우 항공기의 엔진이 건물 벽을 관통해 건물 안으로 들어갈 수 없다고 평가하였으며 따라서 건물로 유입되는 항공유의 양이 제한적이라 화재로 인한 영향 역시 제한적이라는 결론을 도출하였다. 반면, WTI 건물의 경우 벽의 두께가 상대적으로 얇기 때문에 항공유가 유입되는 양이 STEAG에 비하여 더 클 수밖에 없으나 항공유가 모두 건물 하부의 하수구로 배출되어 실제로 화재가 유지되는 시간이 제한적이므로 열적으로도 큰 위험이 없다는 결론을 도출하였다. 최종결론으로 9.11 테러와 같은 의도된 항공기 충돌 사고가 독일의 중간저장시설에 유해한 방사선적 위험을 가져오진 않을 것이라 하였다. 다만 이 연구의 경우에도 상세한 평가 내용 및 평가 방법은 보안상의 이유로 공개되지 않았다.

3.7 체코의 중간저장시설 항공기 충돌 평가

체코의 UJV Rez a.s. div. Energoprojekt Praha에서는 사용후핵연료 중간저장시설에 대한 민간항공기의 충돌

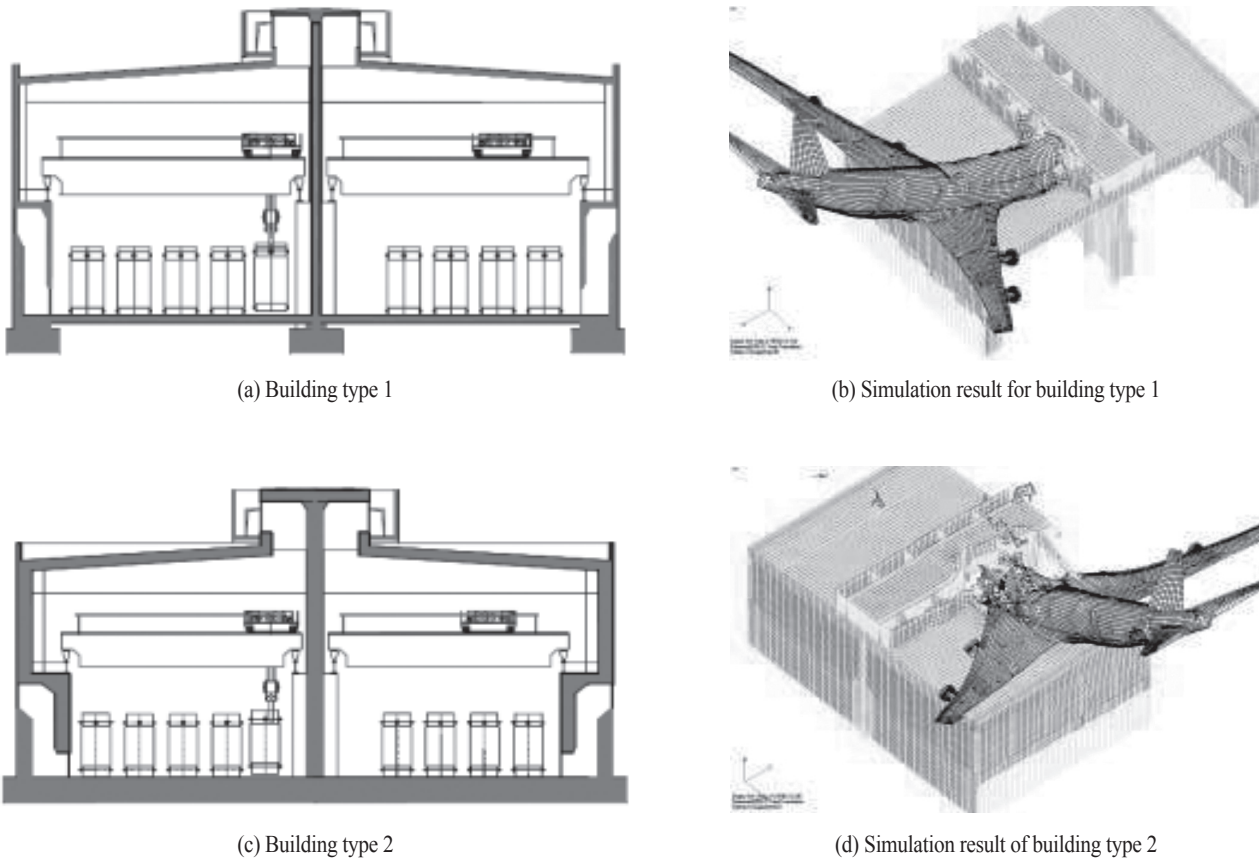


Fig. 5. Safety assessment of spent fuel interim storage facility against aircraft crash (Czech) [13].

안전성평가에 관한 연구를 수행하여 해당 내용을 SMIRT 18에 발표하바 있다[13]. 이 연구에서는 보수적으로 항공기 기종을 설정하여 미국의 EPRI 보고서[14]에 발표된 펜타곤 충돌속도($150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)를 적용하였다. 사용후핵연료 저장용기의 저장시설 건물에 항공기가 충돌하는 몇 가지 시나리오를 도출하여 측면벽에 수직으로 충돌하는 경우와 지붕에 비스듬하게 충돌하는 경우에 대해 상용 구조해석 코드인 ABAQUS를 이용하여 해석을 수행하였다. 이 연구에서 주목할 점은 수직충돌의 경우에는 Riera가 제안한 방식으로 건물의 전 반손상을 평가하였으며 비스듬한 충돌의 경우는 Riera 방법을 적용하기 어렵기 때문에 Fig. 5와 같이 항공기의 유한 요소모델을 작성하여 해석을 수행했다는 것이다. 하지만 작성된 항공기의 유한요소모델에 대한 검증 및 항공기 및 건물의 국부손상평가를 위하여 사용한 요소제거(erosing contact) 기법의 신뢰성에 대한 논거가 제시되지 않아 제

안된 평가기법이 보수성 및 신뢰성을 확보하고 있다고 보긴 힘들다.

3.8 일본의 겸용용기 항공기 엔진 충돌평가

일본 CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry)에서는 사용후핵연료의 중간저장에 사용될 수송저장겸용용기(이하 겸용용기; DPMC)에 대한 항공기 충돌 안전성평가를 수행하였다. 2009년 3월 Journal of Power and Energy Systems에 발표된 연구[15]에서는 대형민항기의 엔진이 사용후핵연료 저장시설의 벽면을 관통해서 시설 내부의 겸용용기를 타격하는 시나리오를 선정하고 이 경우 겸용용기의 기밀성(leak-tightness)의 유지여부를 평가하였다. 충돌체로 고려된 항공기 엔진은 GE/CF6-80C2 (Fig. 6(a))로서 Boeing 747 및 Airbus 300과 같은 대형항공기에 사용되는

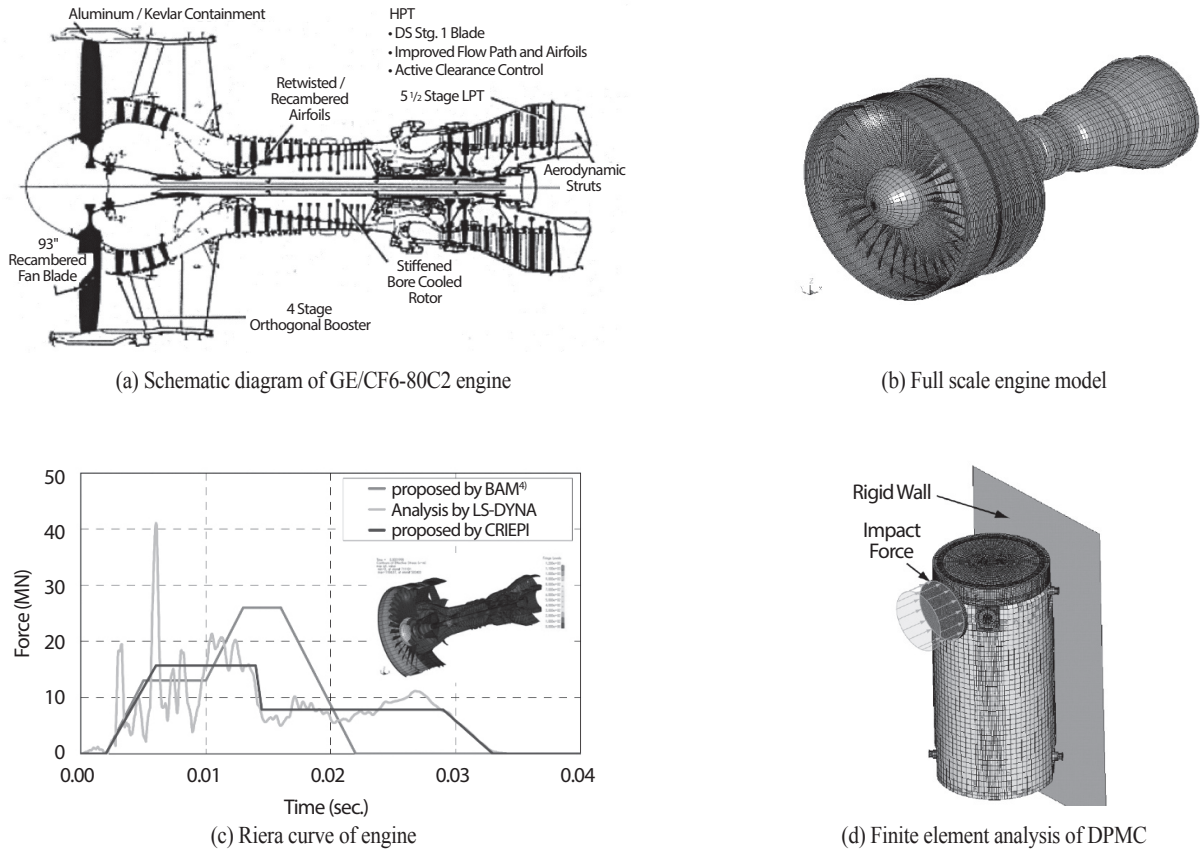


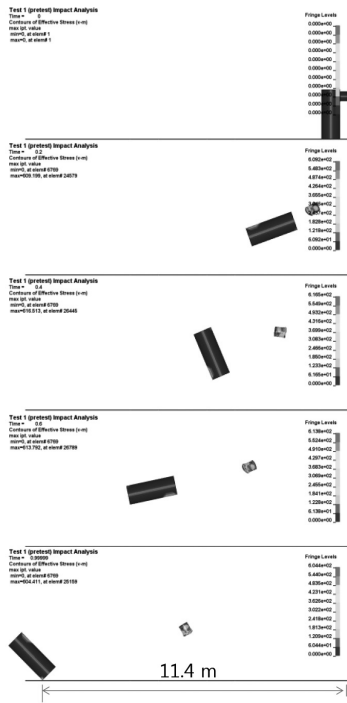
Fig. 6. Simulation of aircraft engine crash into dual purpose metal cask by CRIEPI [15].

것이며 충돌속도는 이착륙시의 속도를 고려하여 $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 산정하였다. 엔진의 벽면 관통 후 속도는 경험적 평가식인 Degen 공식[2]으로 계산되었다. 이 연구에서 특기할 점은 엔진에 의한 충격력을 엔진의 유한요소해석 및 Riera의 접근법을 결합하여 계산하였다는 점이다. Fig. 6(b)와 같이 엔진의 상세 유한요소모델을 작성한 후, 이 모델이 강체벽에 충돌할 때의 충격력 시간이력을 상용소프트웨어 LS-DYNA로 계산한 후 이 충격력 시간이력을 검용용기에 적용하여 구조응답을 평가하였다(Fig. 6(c), (d)). 충격력 시간이력을 계산하는 방법과 검용용기에 엔진이 충돌하는 각도 산정에 보수성을 내포하고 있으며 검용용기의 누설률은 시험적으로 자체 개발한 공식[16]으로 계산하고 있다.

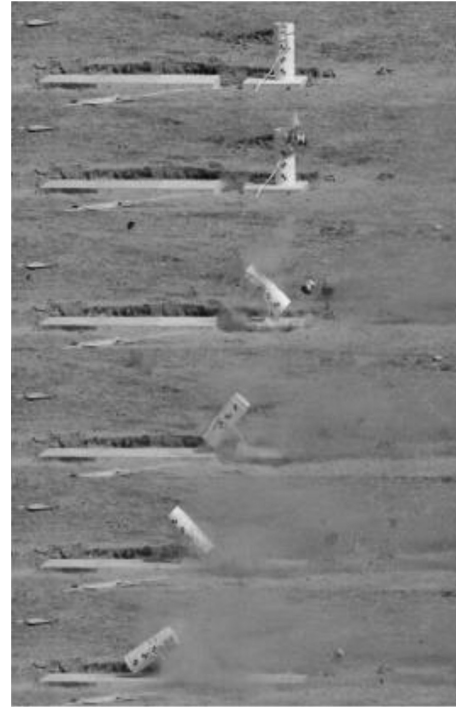
이 연구도 앞에서 살펴본 독일의 중간저장시설 안전성 평가의 경우와 마찬가지로 의도된 항공기 충돌의 시나리오 및 충돌조건 선정, 건물의 안전성 평가, 사용후핵연료

캐스크의 건전성 평가를 주요 연구 내용으로 하고 있다. 건물에 대한 평가는 독일의 연구처럼 상세하게 이루어지지 않았으나 항공기의 엔진이 $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 충돌하였을 때 엔진이 관통해 들어가는 잔류속도가 $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 가 된다고 계산하였다. 사용후핵연료 캐스크는 벽면에 지지된 상태로 엔진과 충돌한다고 가정하였고 충돌 부위는 캐스크의 측면 상단 뚜껑 격납부 근처와 뚜껑 중심부로 설정되었다. 이 두 충돌위치는 캐스크의 격납 구조에 가장 큰 손상을 가져올 수 있는 충돌 위치로 추정된다. 다만 뚜껑 중심부에 수직으로 충돌하는 자세는 직립된 캐스크를 사용하는 경우에는 다소 비현실적인 충돌자세가 된다.

항공기 엔진의 매우 정밀한 유한요소모델을 개발하여 이를 토대로 기준 Riera curve를 구하여 해석에 활용하였다. 이 자료는 추후 한국원자력연구원에서 관련 연구를 수행할 때 활용되기도 하였다.



(a) Simulation



(b) Photographs of physical test

Fig. 7. Dynamic behavior of metal cask after aircraft engine crash [17].

일본에서 사용하는 겸용용기에는 2개의 금속 오링이 격납을 위하여 사용되는데 일반적으로 금속 오링은 고무계열의 오링보다 장기 격납건전성 측면에서 우수한 반면 충격에는 취약한 것으로 알려져 있다. CRIEPI 연구진은 금속오링의 외부 충격에 대한 저항성을 오링 수명의 함수로 모델링하여 그 모델을 이 항공기 충돌 안전성 평가에 적용하였다. 이 모델의 타당성에 관해서는 논란의 여지가 있기는 하지만 캐스크 관련 연구에서는 참고해야할 연구 방향으로 보인다.

3.9 한국원자력연구원 저장용기 대상 해석 및 시험평가

한국원자력연구원에서는 2011년도에 한국원자력환경공단 주도로 개발된 금속수송저장겸용용기 및 콘크리트 저장용기의 항공기 충돌안전성 평가를 전산시뮬레이션으로 수행한 바 있다[17]. 사용후핵연료 수송저장겸용용기가 부지 내에 콘크리트 패드 위에 별도의 방호건물 없이 야적되어 있는 상황을 고려하였다. 국내에 운항 중인 민항기 중 가장 크기가

크고 운항빈도가 높은 Boeing 747 기종의 엔진이 $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 속도로 용기에 직접 충돌하는 시나리오를 고려하였고 보수적인 평가를 위하여 용기에 가장 큰 손상을 가할 것으로 예상되는 충돌자세를 선정하였다. 해석은 상용 유한요소해석코드인 LS-DYNA로 수행되었으며 주 평가대상은 충돌 시 용기에 발생하는 소성변형률 및 볼트격납구조의 거동이었다. 충돌 대상이 되는 항공기 엔진의 모사를 위하여 단순화된 충돌체가 설계되었으며 이는 추후 고속충돌 시험평가에 그대로 사용되었다. 연구 수행 중 Boeing 747의 엔진 설계 정보를 얻는 것이 극히 어려웠기 때문에 일본 CRIEPI에서 개발한 GE/CF6-80C2 엔진의 기준 Riera 함수를 활용하여 충돌체가 설계되었다. CRIEPI와 달리 콘크리트 패드 위에 서있는 캐스크의 거동을 평가하였기 때문에 동적 거동 평가를 위한 해석과 상세한 격납부 건전성 평가를 위한 해석을 별도로 진행하였다. 상대적으로 단순한 모델을 활용한 동적거동 평가의 결과 Fig. 7과 같이 캐스크가 전도되는 것이 아니라 충격방향으로 큰 모멘텀을 가지고 비행하는 것이 관찰되었다.

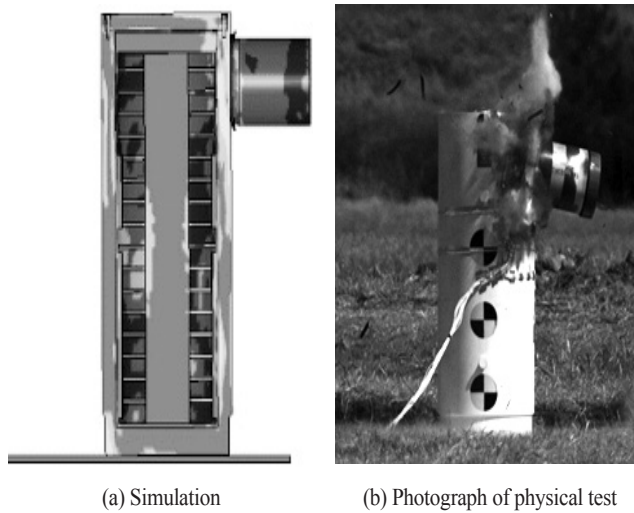


Fig. 8. Assessment of containment boundary integrity after aircraft engine crash [17].

보다 상세한 모델을 이용한 격납건전성 평가(Fig. 8)에서는 오링 근처의 뚜껑과 볼트의 거동 평가에 초점이 맞춰졌다. 동적완화(Dynamic Relaxation) 기법을 이용하여 볼트의 체결력이 모사되었으며 항공기 엔진 충돌로 인한 뚜껑의 열림변위와 미끄러짐 변위가 측정되었다. 뚜껑의 열림 변위로부터 캐스크 내부의 핵종이 누설될 수 있는 누설경로(leak-path)의 생성 여부를 판단하였으며 여기에는 미국 SNL에서 사용한 방법을 적용하였다[18]. 항공기 엔진이 측면으로 충돌하는 경우에는 격납부에 큰 손상이 오기는 하나 유의한 누설량이 발생할 만큼의 누설경로가 생성되지는 않는다는 결론이 도출되었다.

전산 시뮬레이션 검증 및 금속수송저장겸용용기의 항공기 충돌 안전성 검증을 위하여 1/3 스케일모델을 이용한 시험이 수행되었다. 167 kg의 발사체를 150 m·s⁻¹로 발사하는 시험을 수행하기 위하여 국방과학연구소(ADD)에 시험을 의뢰하여 공동으로 시험업무가 진행되었다. 발사체의 발사는 Counter Mass Gun이란 장비로 수행되었다. 시험과 해석결과와의 비교평가를 위해 캐스크의 주요한 위치에서의 변형률 및 가속도 데이터를 취득하였다. 정확한 충돌조건 및 용기의 거동을 파악하기 위하여 초고속카메라를 이용한 영상데이터가 수집되었으며 시험이 종료된 후 헬륨누설시험을 수행하여 용기의 안전 여부를 평가하였다. 시험으로 얻어진 데이터 및 안전평가의 결론이 해석상으로 도출된 결과와 매우 잘

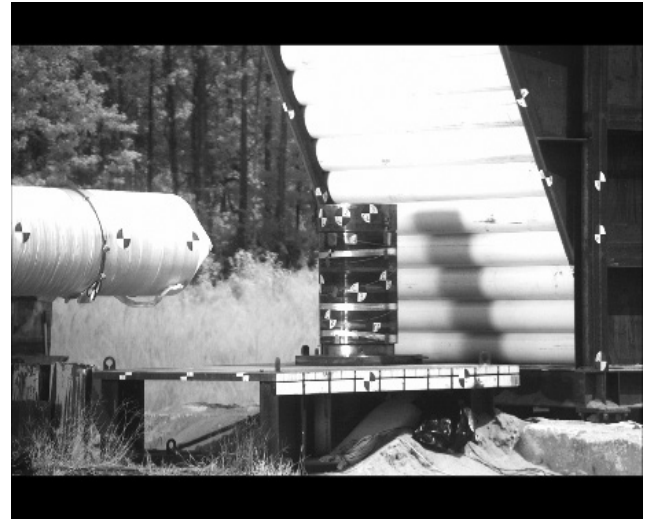


Fig. 9. Photograph of HI-STAR180 aircraft crash test [19].

일치하였음을 확인하였다(Fig. 7-8).

3.10 Holtec International HI-STAR 180 대상 시험평가

2013년 8월 29일 Holtec International 사는 미군기지 내에서 자사의 HI-STAR 180 겸용용기에 특수 제작된 비행체를 고속으로 충돌시키는 시험을 수행하였다[19]. HI-STAR 180은 수송, 저장겸용용기로서 미국에서는 고연소연료와 혼합산화물(MOx) 연료를 운반할 수 있는 운반인허가를 취득한 상태이다. 단조강을 주재료로 하며 볼트 격납구조를 가지는 용기이다. 상기 항공기 충돌 시험은 스위스 규제기관(ENSI)의 요구로 수행되었다. 2장에서 설명된 바와 같이 스위스는 군용기의 충돌을 원전설계 시 중요한 설계기준사고로 고려하고 있다. 본 시험은 상기요건의 연장선상에 있는 것으로 파악된다. 스위스 규제기관에서 Holtec사에 설계기준충격력(리어 함수)을 제시하였고 이를 바탕으로 충돌체가 설계, 제작되었다. 시험당시 충돌체는 약 600 Mile·h⁻¹(=267 m·s⁻¹)의 속도로 충돌하였고 시험 결과 HI-STAR 180의 누설량은 스위스 규제기관에서 제시한 허용치보다 100배 이상 낮은 누설량을 보였다고 발표되었다. 시험 시 고려된 충돌위치 및 각도는 Fig. 9와 같이 용기 상단부에 횡으로 충돌하는 자세이다.

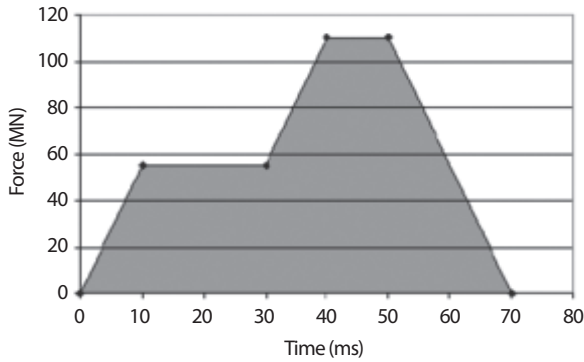
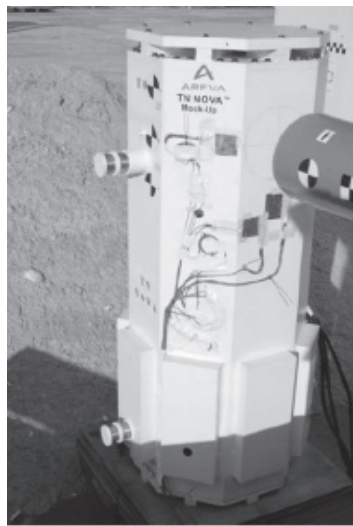


Fig. 10. Riera curve considered in the aircraft crash test of TN-NOVA [20].

3.11 AREVA TN NOVA 대상 시험평가

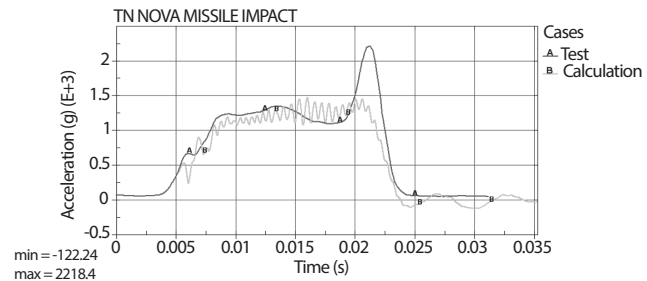
TN의 NOVA 시스템은 캐니스터를 채용한 금속저장용기이다. NUHOMS 시스템에 사용되는 것과 동일한 DSC (Dry Shielded Canister)와 TN-NOVA 오버팩, 그리고 DSC의 운반을 위한 MP-197B 운반용기로 전체 운영시스템이 구성된다. TN-NOVA의 특징은, 캐니스터를 사용하는 저장용기이지만 콘크리트가 아닌 금속 오버팩을 채용하고 있다는 점이다. 실제 전세계의 저장시스템 도입 현황을 보면 콘크리트 용기 및 모듈을 활용하는 국가는 주로 미국이며 대부분의 유럽



(a) Right before impact



(b) Impacting moment



(c) Comparison of cask acceleration history

Fig. 11. TN-NOVA aircraft crash test [20].

Table 1. Summary of safety assessment of spent nuclear fuel storage facility against targeted aircraft crash performed in various countries

Nations	Aircraft	Impact velocity	Notes
USA	Large passenger aircraft (e.g. Boeing 767)	150 m·s ⁻¹	The assessment criteria and methodology are stipulated in the regulations for reactor licensing
Japan	Large passenger aircraft (Boeing 747)	90 m·s ⁻¹	Assessment of cask inside storage building with numerical simulations and physical tests
Germany	Large passenger aircraft (Boeing 747-400, Airbus 340-600)	Unrevealed	Impact velocity and orientations were derived using flight simulator but detailed information is not revealed
Switzerland	Fighter aircraft	215 m·s ⁻¹	Detailed load-time curve was provided by the licensing authority
Czech	Large passenger aircraft (B707)	100 m·s ⁻¹	Numerical simulations were used to deal with oblique impact of aircraft with storage building

국가들은 금속용기를 사용하고 있는 실정이다. 일반적으로 금속접합용기의 경우 수송안전성까지 만족시켜야 하기 때문에 상당히 고가로 알려져 있고 콘크리트 저장용기의 경우 결합용기의 절반 이하의 가격으로 알려져 있는데 NOVA 시스템의 경우 상기 두 시스템의 중간 정도의 가격으로 생산 가능하다고 한다. 앞 절의 HI-STAR 180의 경우와 마찬가지로 TN NOVA도 스위스 규제기관 ENSI의 요구로 항공기 충돌을 모사하는 시험을 2013년도에 수행하였다[20].

스위스 규제기관이 제시한 충돌조건은 다음과 같다.

- 유효충돌면적: 7 m²
- 충돌체 무게: 20,000 kg
- 충돌속도: 215 m·s⁻¹
- 충격력 시간이력: Fig. 10에 제시

상기 충돌조건은 HI-STAR 180의 경우에서 언급되었듯이, 군용비행기의 충돌조건에 해당하며 충돌하중곡선이 함께 제시가 되었다. TN의 경우도 1/3 축소모델을 이용하여 시험을 수행하였으며 시험 후에도 DSC가 기밀(leak-tightness)을 유지하였다고 보고되었다. 이 시험에서 고려된 충돌조건도 HI-STAR 180의 경우와 비슷하게 캐니스터 용접부에 가장 많은 충격이 가는 측면충돌이었다. Fig. 11는 시험 당시 촬영된 충돌 직전, 충돌 시 모습과 실제 측정된 충격가속도의 시간이력이다.

4. 결론

본 논문에서는 사용후핵연료 건식저장시설을 위주로 핵주기시설에 사고 혹은 의도된 항공기 충돌이 발생하는 경우에 대비한 안전성 평가와 관련하여 세계 각국에서 수행된 평가 및 연구의 사례를 정리하였다. 또한 항공기 충돌에 대비한 각국의 법제화 내용을 사고로 인한 충돌의 경우와 의도된 충돌의 경우로 나누어 살펴보았다. 대부분의 국가에서 사용후핵연료 건식저장시설에 대한 항공기 충돌 평가 요건을 명시적으로 가지고 있지는 않았으며 원자로에 적용되는 기준을 준용하고 있는 것으로 판단된다. 다만, 이 요건이 명시적으로 법제화되지 않았다고 해서 인허가 과정에서 해당 요건이 고려되지 않는다는 것을 의미하지 않음에 유의해야 한다.

본 논문에서 정리한 사용후핵연료 건식저장시설에 대한 항공기 충돌 평가 관련 현황을 정리하면 Table 1과 같다.

명시적 법규로 법제화되어 있는지의 여부와 별개로 많은 국가에서 매우 가혹한 조건을 고려한 항공기충돌에 대한 평가를 수행하고 있으며 이를 새로이 도입되는 원자력발전소 및 관련 시설의 설계 및 인허가에 반영하고자 하는 추세를 확인할 수 있었다. 또한 항공기 충돌에 대비한 안전성이 각국의 원자력 시설의 안전 수준을 가늠, 홍보하는 지표로 사용되고 있는 정황도 관찰된다. 이에 우리나라에서도 추후 건설될 사용후핵연료 중간저장시설 등의 설계, 건설, 운용에 항공기 충돌과 같은 설계기준외사고에 선제적으로 대비할 필요가 있다고 판단되며 관련된 평가기술, 규제기술 등의 다각적인 연구개발이 필요하다. 많은 국가에서 의도된 항공기 충돌의 상세한 평가 요건은 각국에서 기밀로 하고 있어 정보를 얻는 것이 쉽지 않은 상황이므로 우리나라의 상황 및 세계적 추세를 적절히 고려한 상세 규제 요건을 수립하는 것 역시 매우 중요한 일이라 판단된다.

REFERENCES

- [1] International Atomic Energy Agency, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1 (2006).
- [2] U.S. Department of Energy, Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities, DOE Standard, DOE-STD-3014-2006 (2006).
- [3] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Reactor site criteria, Title 10, Code of Federal Regulation, Part 100, Washington, D.C. (2015).
- [4] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants, Chapter 3.5.1.6 Aircraft Hazard, U.S. NRC, NUREG-0800, Washington, D.C. (2014).
- [5] J.D. Stevensen, "Survey of Extreme Load Design Regulatory Agency Licensing Requirement for Nuclear Power Plant", Nucl. Eng. Des., 37(1), 3-22 (1976).
- [6] J.D. Riera, "On the Stress Analysis of Structures Subject to Aircraft Impact Forces", Nucl. Eng. Des., 8(4),

- 415-426 (1968).
- [7] J.D. Riera, “A Critical Reappraisal of Nuclear Power Plant Safety Against Accidental Aircraft Impact”, *Nucl. Eng. Des.*, 57(1), 193-206 (1980).
- [8] T. Sugano, H. Tsubota, Y. Kasai, N. Koshika, S. Orui, W.A. von Riesenmann, D.C. Bickel, and M.B. Parks, “Full-scale Aircraft Impact Test for Evaluation of Impact Forces”, *Nucl. Eng. Des.*, 140(3), 373-385 (1993).
- [9] T. Sugano, H. Tsubota, Y. Kasai, N. Koshika, H. Ohnuma, W.A. von Riesenmann, D.C. Bickel, and M.B. Parks, “Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles: Part 1. Test program, method and results”, *Nucl. Eng. Des.*, 140(3), 387-405 (1993).
- [10] T. Sugano, H. Tsubota, Y. Kasai, N. Koshika, C. Itoh, K. Shirai, W.A. von Riesenmann, D.C. Bickel, and M.B. Parks, “Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles: Part 2. Evaluation of test results”, *Nucl. Eng. Des.*, 140(3), 407-423 (1993).
- [11] B. Droste, H. Völzke, G. Wieser, and L. Qiao, “Safety Margins of Spent Fuel Transport and Storage Casks Considering Aircraft Crash Impacts”, *RAMTRANS*, 13(3-4), 313-316 (2002).
- [12] B. Thomaske, “Realization of the German concept for interim storage of spent nuclear fuel –Current situation and prospects–”, *Proc. of Waste Management 2003 Conference*, February 23-27, 2003, Tucson.
- [13] J. Stephan, J. Maly, and I. Holub, “Consequences of the Large Commercial Aircraft Crash into the Interim Spent Fuel Storage Facility”, *Proc. of 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, August 7-12, 2005, Beijing.
- [14] Nuclear Energy Institute. December 2002. “Deterring Terrorism: Aircraft Crash Impact Analyses Demonstrate Nuclear Power Plant’s Structural Strength”, Accessed Mar. 15 2019. Available from: http://www.safesecurevital.com/pdf/EPRI_Nuclear_Plant_Structural_Study_2002.pdf.
- [15] K. Shirai, K. Namba, and T. Saegusa, “Safety Analysis of Dual Purpose Metal Cask Subject to Impulsive Loads due to Aircraft Engine Crash”, *J. Power Energy Syst.*, 3(1), 72-82 (2009).
- [16] T. Yokoyama, H. Kawakami, N. Uchiyama, M. Yasuda, and S. Matsuoka, “Integrity Assessment of Dual Purpose Metal Cask after Long Term Interim Storage-Seal Performance under Transport Condition”, *Proc. of 14th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2004)*, September 20-24, 2004, Berlin.
- [17] S.H. Lee, W.S. Choi, and K.S. Seo, “Safety Assessment of a Metal Cask under Aircraft Engine Crash”, *Nucl. Eng. Technol.*, 48(2), 505-517 (2016).
- [18] J.L. Sprung, D.J. Ammermann, N.L. Breivik, R.J. Dukart, F.L. Kanipe, J.A. Koski, G.S. Mills, K.S. Neuhouser, H.D. Radloff, R.F. Weiner, and H.R. Yoshimura, *Reexamination of Spent Fuel Shipment Risk Estimates*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6672, Washington, D.C. (2000).
- [19] Holtec International. September 3, 2013. “U.S. Army’s Missile Launcher Strikes HI-STAR 180 with Pinpoint Accuracy: A Red Letter Day for Holtec’s Transport Cask Program”, *Holtec Highlights HH28.17*, Accessed Mar. 15 2019. Available from: <https://holtecinternational.com/2013/09/03/u-s-armys-missile-launcher-strikes-hi%E2%80%90star-180-with-pinpoint-accuracy-a-red-letter-day-for-holtecs-transport-cask-program/>.
- [20] M. Herouart and P.A. Monsigny, “TN NOVA™ Storage Licensing and Airplane Crash Test”, *Proc. of the 17th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2013)*, August 18-23, 2013, San Francisco.