

사용후연료 운반용기의 격납 성능에 미치는 항공기 엔진 충돌위치의 영향 고찰

김종성[†] · 김창종^{*}

Investigation on Effect of Aircraft Engine Crash Location on Containment Performance of a Spent Nuclear Fuel Transport Cask

Jong-Sung Kim[†] and Chang Jong Kim^{*}

(Received 16 October 2023, Revised 19 November 2023, Accepted 12 December 2023)

ABSTRACT

The paper presents the results investigating the effect of aircraft engine impact location on the intended function evaluation results of spent nuclear fuel transport cask. As a result of the investigation, it is found that the structural integrity is maintained as the maximum accumulated equivalent plastic strain is below the acceptable criterion regardless of the collision location. It is identified that when the aircraft engine collided with the upper part of the transport cask without considering impact limiter the containment performance is weakened compared to when the aircraft engine collided with the central part.

Key Words : Spent Nuclear Fuel Transport Cask (사용후연료 운반용기), Aircraft Engine Crash (항공기 엔진 충돌), Finite Element Impact Analysis (유한요소 충격해석), Structural Integrity (구조 건전성), Containment Performance (격납 성능), Crash Location (충돌 위치)

1. 서 론

향후 소내 사용후연료 건식 저장소의 저장 용량은 한계에 다다를 것으로 예상된다. 이에 따라 소내 저장된 사용후연료는 빈번하게 소내 또는 소외 운반이 발생할 것으로 예상된다. 이러한 사용후연료 운반을 위해 국내에서 다양한 운반용기를 개발한 바 있다⁽¹⁻³⁾. 사용후연료 운반용기의 고유기능은 운반동안 운반용기 안의 사용후연료가 손상되지 않아야 할 뿐만 아니라 혹 사용후연료가 손상 되더라도 방사성 물질의 외부환경 유출을 차단하여야 한다는 것이다. 운반과정 동안 낙하사고와 같은 에너지 제한사건이

발생할 때 사용후연료 운반용기는 구조 건전성이 유지하도록 설계 제작되어야 한다⁽⁴⁾.

2001년 9월 11일 미국에서 발생한 항공기 자살 테러 사건으로 인해 국가기반 시설의 사보타주 공격에 대한 방호에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 원자력 관련 시설은 방사성 물질 누출과 같은 2차적인 피해가 확산될 수 있으므로 사보타주 공격에 대한 원자력 관련 시설의 구조 건전성 입증은 요구받고 있다. 최근 US NRC는 새롭게 도입되는 원자력 발전소의 인허가를 위한 10CFR50.150⁽⁵⁾ 규정에 항공기 충돌에 대한 요건들을 포함시켰다. 국내외 연구들⁽⁶⁻¹²⁾이 사보타주 공격시 사용후연료 운반용기에 대해 다양한 충돌시나리오를 적용한 구조 건전성 평가를 수행한 바 있으나 국내 운반용기에 대해 다양한 충돌시나리오(예: 충돌지점)를 적용한 신뢰성 있는 평가는 미비한 실정이다. 항공기 엔진 충돌시 운

[†] 책임저자, 회원, 세종대학교
E-mail: kimjsbat@sejong.ac.kr
TEL: ***-***** FAX: (02)3408-4413
^{*} 세종대학교 대학원

반응기 몸체의 구조 건전성 유지 뿐만 아니라 뚜껑의 격납 성능 유지 여부와 같은 또다른 고유기능의 유지 또한 중요하다.

본 연구는 사용후연료 저장 및 운반의 이중 목적의 용기인 KORAD-21⁽¹³⁾을 대상으로 항공기 엔진이 다양한 지점을 충돌시 구조 건전성 및 격납 성능 유지라는 고유기능에 미치는 영향을 유한요소 충돌해석을 통해 고찰하였다.

2. 유한요소 충돌해석 및 충돌위치 영향 분석

2.1 해석 대상

Fig. 1은 KORAD-21의 기하학적 형상⁽¹³⁾이다. 본 연구의 목적을 효율적으로 달성하기 위해 격납이라는 가장 중요한 역할을 수행하는 캐스크 몸체와 캐스크 뚜껑은 실제 형상을 고려하여 모델링하였고 캐스크 내부의 캐니스터, 캐니스터 집합체, 사용후연료 집합체 등은 Table 1과 같이 해당 부품의 질량을 캐스크 몸체와 캐스크 뚜껑에 반영하여 단순화하였다. 캐스크 몸체와 캐스크 뚜껑 볼트체결은 40개의 직경 48 mm인 M48 육각 볼트에 의한 체결을 고려하였다. 캐스크를 밀봉하기위한 개스킷은 알루미늄 이중 O-ring이다. 충돌체인 항공기 엔진은 국내에서 가장 큰 B737-900의 항공기 엔진(CFM56-7B24)⁽¹⁴⁾을 원통형상으로 단순화하였다.

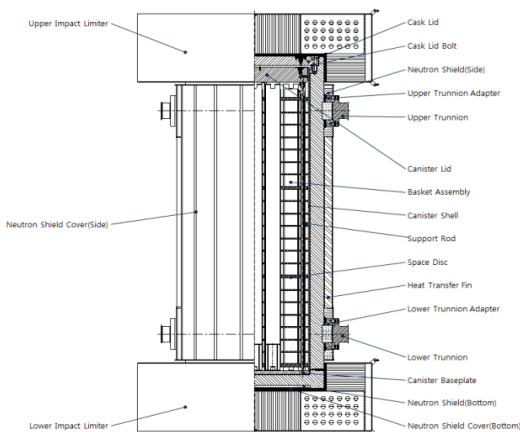


Fig. 1 Schematic configuration of KORAD-21.

사용후연료 운반용기의 외경과 내경은 각각 708.68 mm와 565.34 mm이며 높이는 1,635 mm이다.

Table 1 Design details of KORAD-21 and CFM56-7B24

Component	Subcomponent	Dimensions (mm)	Mass (kg)
KORAD-21	Cask Body	∅2,126 × 5,285	66,066
	Cask Lid	∅1,955 × 150	4,114
	Canister	∅1,686 × 4,880	8,144
	Basket Assembly	241 × 241 × 4,550	4,114
	Disk	∅1,686 × 50	0.312
	Fuel Support	214 × 214 × 340	1.104
	Support Rod	∅50 × 4,580	0.686
	Spent Nuclear Fuel Assembly	214 × 214 × 4,059	13,965
	M48 Bolt	∅48 × 190	-
	Gasket (O.D./Thickness)	∅10 / 1.2	-
CFM56-7B24	-	∅1,829 × 2508	2,390

총 질량은 2.59 ton이다. 재질은 저합금강인 SA350 LF3이다. 충돌체인 항공기 엔진은 B737-900의 엔진을 고려하되 1/3로 축소하였다. 외경은 464.12 mm이며 길이는 900 mm이다. 총 질량은 0.167 ton이며 재질은 저합금강 A4340으로 가정하였다. 충돌조건은 항공기 엔진이 용기 몸체의 중앙을 충돌한다고 가정하였다. 충돌속도는 150 m/s로 설정하였다.

2.2 해석 방법

Fig. 2는 3가지 충돌지점(캐스크 중앙 충돌, 캐스크 상단 완전 충돌, 캐스크 상단 부분 충돌) 경우의 유한요소 모델을 보여주고 있다. 모든 경우 Fig. 2(d)에서 보이는 바와 같이 위에 바라보았을 때 엔진 축방향 중심선이 캐스크 중심선과 일치한다. 캐스크 몸체, 캐스크 뚜껑, 항공기 엔진은 Solid 요소를 사용하였고 요소 특성은 3차원 1차 저감적분 요소이다. 캐스크 몸체와 캐스크 뚜껑 접합부에 위치한 볼트와 개스킷은 그림 3과 같이 볼트(M48)는 Beam 요소, 개스킷은 Spring 요소를 사용하여 모델링하였고 각각의 요소특성은 3차원 1차적분 요소이다. 캐스크는 요소 수를 감소시켜 해석 속도 향상을 위해 절반만 모델링 하였다. 캐스크의 절점수와 요소수는 각각 455,200개, 421,911개이다. 엔진의 절점수와 요소수는 각각 14261개, 10,556개이다.

캐스크 몸체 바닥면은 강체요소로 모델링한 지표

면과의 마찰조건이 부가되었다. 이외에는 어떠한 구속조건도 없다. 엔진은 수직 및 반경방향 변위와 길이방향, 반경방향 및 수직방향 회전은 구속된다. 용기 외표면과 엔진 표면 사이의 접촉은 일반적인 접촉 조건을 사용하였는데 엔진 표면은 마스터로 캐스크 표면은 슬레이브로 설정하였다.

식 (1)과 같은 Johnson-Cook 경화 모델을 소성경화 거동 구성방정식으로 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0})] \times [1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 항복강도, $\bar{\epsilon}^{pl}$ 는 등가소성변형률, $\dot{\epsilon}^{pl}$ 는 등가소성변형률 속도, $\dot{\epsilon}_0$ 는 참조 변형률 속도, T 는 온도, T_m 는 용융온도, T_r 는 참조온도, A 는 초기 항복강도, B 는 변형률 경화상수, C 는 변형률 속도 상수, n 은 변형률 경화지수이며 m 은 열 연화지수이며 Table 2에 제시되고 있다⁽¹⁵⁾.

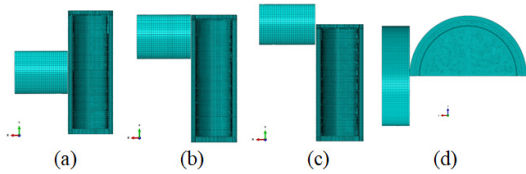


Fig. 2 Finite element model: (a) crash into center of the cask, (b) full crash into top of the cask, (c) partial crash into top of the cask, and (d) overhead view.

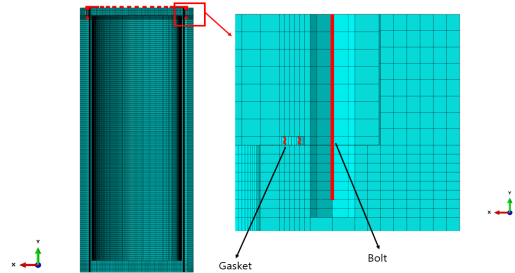


Fig. 3 Finite element model of bolts and gasket.

본 연구에서는 Johnson-Cook 동적 파손모델을 사용하여 캐스크 몸체 유한요소의 누적 손상이 허용기준을 초과시 해당요소를 삭제하였다. 식 (2)와 (3)은

Johnson-Cook 동적 파손모델의 방정식을 보여주고 있는데 식 (2)의 손상 ω 가 1에 도달시 해당 요소의 하중 지지능력은 상실된다.

$$\omega = \sum \Delta \bar{\epsilon}^{pl} / \bar{\epsilon}_f^{pl} \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})][1 + d_4 \ln(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0})] \times [1 + d_5 (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})] \quad (3)$$

여기서 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 는 파단 소성변형률, $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ 는 등가소성변형률 증분, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 는 재료상수들, p 는 압력 응력, q 는 von Mises 유효응력이다. Table 3은 각 재료별 재료상수를 제시하고 있다⁽¹⁵⁾.

Johnson-Cook 동적파손모델 이외에 추가적으로 등가소성변형률이 3.0을 초과시 칩식되어 해당 요소는 하중 지지능력을 상실한다고 고려하였다.

Table 2 Variable value about Johnson-Cook hardening model for each material⁽¹⁵⁾

Variable	SA350 LF3	A4340
A (MPa)	433.5	792.0
B (MPa)	1448.0	510.0
n	0.18	0.26
C	0.8292	0.014
$\dot{\epsilon}_0$ (1/s)	1.0	1.0
T_m (K)	1733	1793
T_r (K)	300	293
m	0.3759	1.0300

Table 3 Material constant value about Johnson-Cook dynamic failure model for each material⁽¹⁵⁾

Constant	SA350 LF3	A4340
d_1	0.0250	-0.8
d_2	16.93	2.1
d_3	-14.8	-0.5
d_4	0.0214	-0.002
d_5	0.0	0.6

Fig. 4와 같이 볼트의 예비하중과 최대허용하중은 각각 411 kN, 1162.56 kN이다. 알루미늄이 코팅된 금속 개스킷의 강성은 Fig. 5와 같이 탄성강성 $E' = 865.8537 \text{ N/mm}^2$, 소성강성 $H' = 35.59322 \text{ N/mm}^2$ 이

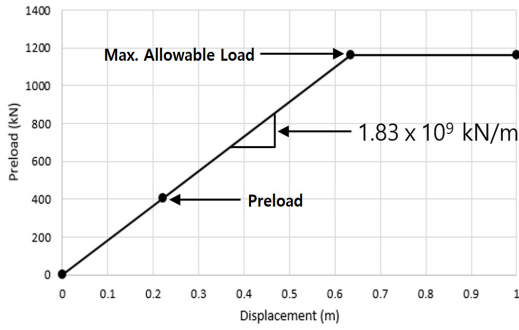


Fig. 4 Performance curve of the M48 bolt.

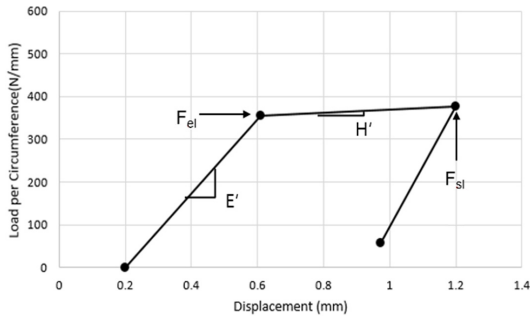


Fig. 5 Performance curve of the Aluminum O-ring.

고 탄성/최대허용 하중은 각각 $F_{el} = 355 \text{ N/mm}$, $F_{sl} = 376 \text{ N/mm}$ 이다.

본 연구에서는 상용유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁶⁾를 사용하였는데 볼트 예비하중 해석과 충돌해석은 각각 Implicit Version과 Explicit Version을 사용하였다. 충돌해석은 예비하중 해석 결과를 초기조건으로 설정하여 수행하였다.

2.3 충돌위치 영향 분석 결과

Fig. 6은 충돌이 완료된 후 캐스크 몸체 중앙부에 엔진이 충돌한 경우의 최대 누적 등가소성변형률 분포를 보여주고 있다. Fig. 6(a)에서 보이는 바와 같이 캐스크 몸체 중앙부 충돌의 경우 충돌지점에서 가장 먼 쪽의 볼트 체결부에서 누적 등가소성변형률이 발생하였고 뚜껑을 제외하면 Fig. 6(b)에서 보이는 바와 같이 충돌 지점 부근에서 최대 누적 등가소성변형률이 발생하였다. Fig. 7은 각 충돌지점별 최대 누적 등가소성변형률 발생 지점에서의 시간 변화에 따른 누적 등가소성변형률의 변화를 보여주고 있다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 모든 충돌 경우 침식 등가소성변형률 허용치 3.0을 초과하지도 Johnson-Cook

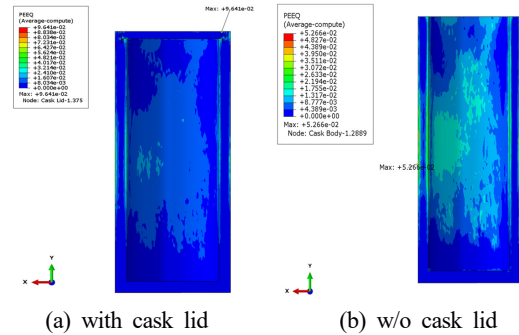


Fig. 6 Accumulated equivalent plastic strain distributions of the cask for the center crash case.

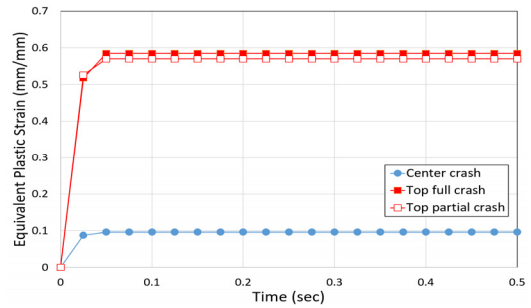


Fig. 7 Variation of equivalent plastic strains on the max. generation points vs. the crash locations.

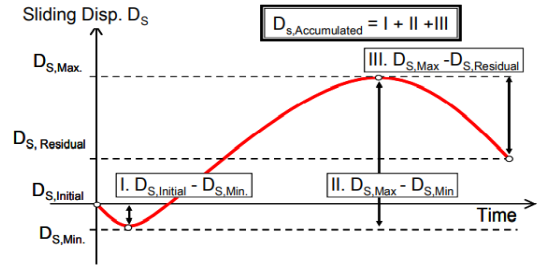


Fig. 8 Definition of accumulated relative displacement (8).

동적파손모델의 손상 1.0을 유발할 정도로 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 JNES⁽⁸⁾에서 개스킷의 기밀성 평가시 사용되는 누적 상대변위의 정의를 보여주고 있다. Table 4는 JNES의 방법에 따라 계산된 각 충돌경우의 최대 누적 상대변위를 제시하고 있다. 표에 제시된 바와 같이 캐스크 몸체 상단부 충돌 경우들이 중앙부 충돌 보다 최대 누적 상대변위가 크음을 알 수

Table 4 Comparison of max. accumulated relative displacements among three crash cases.

Crash case	Max. accumulated relative displacement (mm)	
	Sliding	Opening
Center	11.79	7.20
Top full	17.01	55.19
Top partial	18.41	64.49

Table 5 Comparison of max applied loads of the bolts among three crash cases

Crash case	Max. applied load of the bolts (kN)
Center	1162.11
Top full	1162.65
Top partial	1162.66

있다. 특히 개방 변위가 훨씬 크다. 또한 상단부 부분 충돌의 경우가 상단부 전체 충돌의 경우 보다 큰 누적 상대변위를 보인다. 이는 상단부 부분 충돌의 임을 알 수 있다.

본 연구에서는 충돌해석으로부터 얻은 볼트에 걸리는 최대 하중을 Fig. 4에 제시된 볼트의 최대 허용하중 1162.56 kN과 비교하여 뚜껑의 개폐여부를 평가하였다. Table 5는 각 충돌경우의 최대 볼트 작용하중을 비교 제시하고 있다. 표에 제시된 바와 같이 캐스크 몸체 중앙부 충돌의 볼트 최대 작용하중 1162.11 kN이 허용하중 보다 작은 반면 상단부 충돌 경우들은 최대 작용하중이 허용하중 보다 크게 발생함을 알 수 있다. 즉 상단부 충돌 경우는 캐스크 뚜껑이 열릴 수 있는 반면 중앙부 충돌은 열리지 않음을 유추할 수 있다.

4. 결 론

사용후연료 운반용기에 항공기 엔진이 충돌할 때 충돌지점의 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 3가지 충돌 경우 (중앙부 충돌, 상단부 전체 충돌, 상단부 부분 충돌) 모두 항공기 엔진이 캐스크 몸체를 관통하지는 못하며 캐스크 몸체와 뚜껑을 체결하는 볼트들에 가장 높은 누적 등가소성변형률이 발생

- 캐스크 몸체와 뚜껑을 체결하는 볼트의 최대 누적 상대변위와 최대 작용하중 결과를 보면 상단부 충돌 경우들이 중앙부 충돌 보다 뚜껑의 격납 기능이 상실될 가능성이 높음

후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 2106064).

참고문헌

- (1) Chung, S.H., Lee, H.Y., Song, M.J., Diersch, R., and Laug, R., 2002, "Evaluation of the KN-12 Spent Fuel Transport Cask by Analysis," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 34, Iss. 3, pp. 187-201.
- (2) Chung, S.H., Kim, K.Y., and Kim, Y.D., 2016, "KN-18 Spent Fuel Transport Cask," *Proceedings of the 18th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials*, Kobe, Japan, September 18-23.
- (3) Do, H.S., Kim, T.M. and Cho, C.H., 2016, "The Evaluation of Minimum Cooling Period for Loading of PWR Spent Nuclear Fuel of a Dual Purpose metal Cask," *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 411-422. doi:https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2016.14.4.411
- (4) ASME B&PV Code Committee, 2021, *ASME B&PV Code, Sec.III, Div.3, Subsec.WB: Class TC Transportation Containments*, American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (5) 10CFR50.150, 2021, "Aircraft Impact Assessment," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- (6) Thomaske, B., 2003, "Realization of German Concept for Interim Storage of Spent Nuclear Fuel-Current Situation and Prospect," *Proceedings of WM03*, Tucson, AZ, USA, February 23-27.
- (7) Hanifehzadeh, M., Gencturk, B., and Mousavi, R., 2018, "A Numerical Study of Spent Nuclear Fuel Dry Storage Systems under Extreme Impact Loading," *Engineering Structures*, Vol. 161, pp.

- 68-81. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.068>
- (8) Shirai, K., Namba, K., and Saegusa, T., 2009, "Safety Analysis of Dual Purpose Metal Cask Subjected to Impulsive Loads due to Aircraft Engine Crash," *Journal of Power Energy Systems*, Vol. 3, Iss. 1, pp. 72-82. doi:10.1299/jpes.3.72
- (9) Lee, S.H., Choi, W.S., and Seo, K.S., 2016, "Safety Assessment of a Metal Cask under Aircraft Engine Crash," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 48, Iss. 2, pp. 505-517. doi:<https://doi.org/10.1016/j.net.2015.11.002>
- (10) Choi, W.S., Nam, K.O., and Seo, K.S., 2008, "Size Optimization of Impact Limiter in Radioactive Material Transportation Package Based on Material Dynamic Characteristics," *Trans. of the KPVP*, Vol. 4, No. 2, pp. 20-28.
- (11) Shin, J.C., Yang, J.D., Sung, U.H., Ryu, S.W., and Park, Y.W., 2020, "Technology Trends in Spent Nuclear Fuel Cask and Dry Storage," *Trans. of the KPVP*, Vol. 16, No. 1, pp. 110-116. doi:<http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2020.16.1.110>
- (12) Kim, J.S. and M.S. Cha, 2022, "Sensitivity Analysis to Finite Element Analysis Program that Evaluates the Structural Integrity of a Spent Nuclear Fuel Transport Cask Subjected to Extreme Impact Loads," *Trans. of the KPVP*, Vol. 18, No. 2, pp. 50-53. doi:<http://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2022.18.1.050>.
- (13) Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), 2016, "Safety Analysis Report of KORAD-21", pp. 15.
- (14) European Union Aviation Safety Agency(EASA), 2019, "Type-Certificate Data Sheet for CFM56-7B Series Engines", No.E.004, Iss.6.
- (15) ANSYS, 2019, *AUTODYN User Manual*, Ver. 12.0.
- (16) Dassault Systems, 2021, *User's Manuals for ABAQUS*, Ver.6.21.