

<연구논문>

극한 충격하중이 작용하는 사용후핵연료 운반용기의 구조 건전성을 평가하는 유한요소해석 프로그램에 대한 민감도 분석

김종성[†] · 차민식^{*}

Sensitivity Analysis to Finite Element Analysis Program to Evaluate Structural Integrity of a Spent Nuclear Fuel Transport Cask Subjected to Extreme Impact Loads

Jong-Sung Kim[†] and Min-Sik Cha^{*}

(Received 17 November 2022, Revised 20 December 2022, Accepted 21 December 2022)

ABSTRACT

To investigate the validity of the finite element analysis program to assess structural integrity of a spent nuclear fuel transport cask subjected to extreme impact loads, structural integrity of the cask for the case of an aircraft engine collision is evaluated using three FE analysis programs: Autodyn, Speed and ABAQUS explicit version. As a result of all analyses, it is confirmed that no penetration occurred in the cask wall. Even though the different programs are used, it is identified that there are insignificant differences in the FE analysis variables such as von Mises effective stress and equivalent plastic strain among the programs.

Key Words : Spent Nuclear Fuel Transport Cask (사용후핵연료 운반용기), Aircraft Engine Crash (항공기 엔진 충돌), Finite Element Impact Analysis (유한요소 충격해석), Sensitivity Analysis (민감도 분석)

1. 서 론

소내 사용후핵연료 건식 저장소의 용량 한계로 인해 사용후핵연료의 운반은 향후 빈번하게 발생할 것으로 예상된다. 이러한 사용후핵연료 운반을 위해 다양한 운반용기를 개발하였다⁽¹⁻³⁾. 사용후핵연료 운반용기 관련 기술기준인 ASME B&PV Code, Sec.III, Div.3, Subsec.WB⁽⁴⁾에 따르면 운반과정 동안 낙하사고와 같은 에너지제한사건이 발생할 때 구조 건전성이 유지함을 설계단계에서 입증하여야 한다.

9.11 테러 사고 이후, 사용후핵연료를 포함한 방사성 재료에 대한 사보타주 공격을 대비하여야 함을

요구받고 있다. 최근에 US NRC는 새롭게 도입되는 원자력 발전소의 인허가를 위한 10CFR50.150⁽⁵⁾ 규정에 항공기 충돌에 대한 요건들을 포함시켰다. 원자력 발전소 뿐만 아니라 여러 국가들은 수치 전산모사와 시험을 이용하여 항공기 충돌에 대한 사용후핵연료 저장설비의 안전성 평가를 수행하였다. 이러한 대비의 일환으로 항공기 엔진이 사용후핵연료 운반용기에 충돌할 때 운반용기의 구조 건전성을 해석적으로 또는 실험적으로 입증한 몇몇 연구들⁽⁶⁻¹¹⁾이 수행되었다. 원전 산업계에서는 해석 프로그램에 대한 검증 유효화 (V&V: verification & validation) 절차는 기본적인 중요 과정임에도 불구하고 이러한 기존 연구들에 수행한 충돌해석은 검증 유효화 절차 수행 없이 특정 하나의 해석 프로그램을 이용하여 구조 건전성을 평가한 것이다.

따라서 본 연구에서는 사용후핵연료 운반용기에

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

^{*} 세종대학교 대학원

항공기 엔진이 충돌할 때, 해당 운반용기의 구조 건전성을 세가지 프로그램들을 이용하여 평가하였고 각 해석결과를 상호 비교하여 해석 프로그램의 유효성을 검토하고 입증하고자 한다.

2. 유한요소 충돌해석 및 민감도 분석 방법

2.1 해석 대상

사용후핵연료를 운반 및 저장할 이중 목적의 용기인 KORAD-21을 대상으로 수행하였다. Fig. 1은 KORAD-21의 기하학적 형상⁽¹²⁾이다. 본 연구는 해석 프로그램에 대한 V&V 목적에 따라 수행되므로 해석의 편이성을 위해 기하학적 형상을 단순화시켰으며 1/3 규모의 축소모형을 적용하였다. 방사성 물질 격납이라는 가장 중요한 역할을 수행하는 용기 몸체만 고려하였다. 외경과 내경은 각각 708.68 mm와 565.34 mm이며 높이는 1,635 mm이다. 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

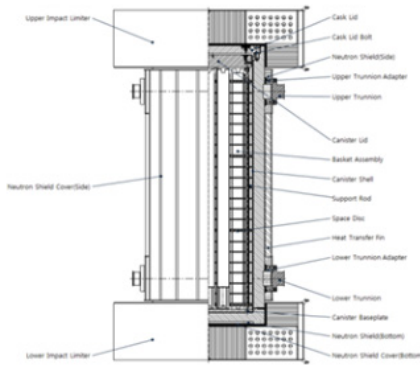


Fig. 1 Schematic configuration of KORAD-21.

2.2 해석 방법

Fig. 2는 유한요소 모델을 보여주고 있다. 용기의 절점수와 요소수는 각각 119,880개와 99,000개이다. 엔진의 절점수와 요소수는 각각 2,261개와 1,872개

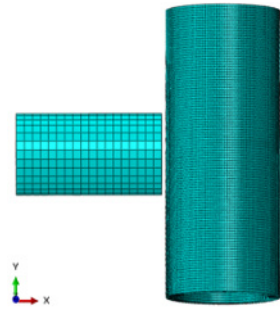


Fig. 2 Finite element model.

이다. 요소 특성은 3차원 1차 저감적분 요소이다.

용기 몸체에는 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 용기 표면은 슬레이브로 설정하였다.

고려되는 소성경화 거동은 소성변형률, 변형률 속도, 온도에 항복강도가 변화하는 Johnson-Cook 경화 모델이다. 식 (1)은 Johnson-Cook 경화구성방정식이다.

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\epsilon_0})] \times [1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 항복강도, $\bar{\epsilon}^{pl}$ 는 등가소성변형률, $\dot{\epsilon}^{pl}$ 는 등가소성변형률 속도, ϵ_0 는 참조 변형률 속도, T 는 온도, T_m 은 용융온도, T_r 은 참조온도, A 는 초기 항복강도, B 는 변형률 경화상수, C 는 변형률 속도 상수,

Table 1 Variable value about Johnson-Cook hardening model for each material

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

n 은 변형률 경화지수이며 m 은 열 연화지수이다. 각 재질별 변수 값은 Table 1에 제시되고 있다.

엔진이 용기 몸체에 충돌시 용기 몸체가 특정 변형률 이상 값이 누적되면 해당 요소는 건전성을 유지할 수 없다. 본 연구에서는 파단소성변형률이 변형률 속도, 온도, 응력삼축성에 종속적인 Johnson-Cook 동적 파손모델을 고려하였다. 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.

$$\omega = \sum \Delta \bar{\epsilon}^{pl} / \epsilon_f^{pl} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_f^{pl} = & [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q})][1 + d_4 \ln(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\epsilon_0})] \\ & \times [1 + d_5 (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})] \end{aligned} \tag{3}$$

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 2는 각 재질별 재료상수를 제시하고 있다.

Table 2 Material constant value about Johnson-Cook dynamic failure model for each material

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

Johnson-Cook 동적파손모델 이외에 추가적으로 두 재질 모두 등가소성변형률이 침식변형률 3.0을 초과시 침식되어 해당 요소는 하중 지지능력을 상실한다고 고려하였다.

본 연구에서는 모든 조건을 동일하게 설정하고 3가지 해석 프로그램(ABAQUS Explicit⁽¹³⁾, AUTODYN⁽¹⁴⁾, SPEED⁽¹⁵⁾)을 사용하여 충돌해석을 수행하였다. 3가지 프로그램은 모두 동일한 외연적 동적 절차(explicit dynamic procedure)를 사용하며 정보 보안 측면에서 각 프로그램의 사용자 매뉴얼에 상세한 정보를 제공하지 않고 있으나 UI (user interface) 측면에서 많은 차이가 존재한다.

3. 충돌해석 및 민감도 분석 결과

Fig. 3은 ABAQUS Explicit를 이용하여 해석한 결과로써 충돌이 완료된 후 누적 등가소성변형률 분포를 제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 용기 외표면 충돌영역의 중심 지점에서 가장 큰 누적 등가소성변형률이 발생하며 관통되지 못함을 알 수 있다. 최대 누적 등가소성변형률은 0.09468로써 침식 변형률 3 보다 훨씬 작다.

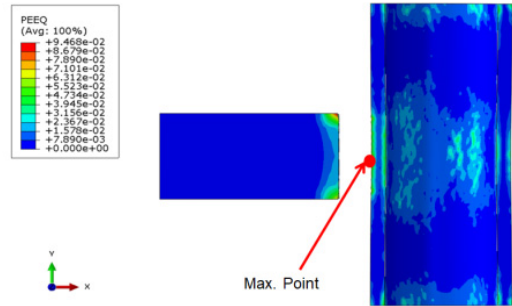


Fig. 3 Accumulated equivalent plastic strain distribution of the cask body after the engine crash

Table 3은 3가지 프로그램 적용 결과를 비교 제시하고 있다. 표로부터 von Mises 유효응력은 최대 29% 이내, 등가소성변형률은 최대 64% 이내의 차이를 보임을 알 수 있다. 등가소성변형률의 차이가 von

Table 3 Comparison of max von Mises effective stresses and max. equivalent plastic strains among three analysis programs

Location	Max. von Mises Effective Stress (MPa)			Max. Equivalent Plastic Strain (mm/mm)		
	ABAQUS Explicit	AUTO DYN	SPEED	ABAQUS Explicit	AUTO DYN	SPEED
Outer surface of center area	6751	4802	5084	0.0423	0.0536	0.0520
Mid point of center area	3063	2352	2307	0.0056	0.0074	0.0070
Inner surface of center area	4971	4729	3744	0.0196	0.0321	0.0242
Relative Difference ^(note) (%)	-	-4.87~ -28.87	-24.68~ -24.69	-	26.71~ 63.78	22.93~ 25.00

note) 100x(The others-ABAQUS)/ABAQUS

Mises 유효응력 경우 보다 63.78%로 크게 도출된 이유는 기준이 되는 등가소성변형률 값이 워낙 작기 때문이다. ABAQUS에 의한 최대 von Mises 유효응력은 다른 프로그램들에 의한 결과들 보다 큰 반면 최대 등가소성변형률은 ABAQUS에 의한 결과가 다른 프로그램들에 의한 결과들 보다 작게 계산되었다. 충돌해석의 불확실성을 고려할 때 상기 차이를 감안하면 3가지 해석 프로그램 모두 거의 동일한 충돌해석 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

사용후핵연료 운반용기 몸체에 항공기 엔진이 충돌하는 경우에 대한 유한요소 충돌해석 및 해석 프로그램에 대한 민감도 분석 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 항공기 엔진 충돌에 기인하여 운반용기 몸체에 어떠한 관통도 발생하지 않았으므로 운반용기의 격납 기능이 유지될 것으로 판단됨
- 3가지 해석 프로그램 모두 합리적으로 일치하는 충돌해석 값들을 도출함

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," *J. 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," *J. 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) Korea Radioactive Waste Agency(KORAD), 2016, "Safety Analysis Report of KORAD-21", pp.15.
- (13) Dassault Systems, 2021, *User's Manuals for ABAQUS Explicit*, Ver.6.21.
- (14) ANSYS, 2019, *AUTODYN User Manual*, Ver.12.0.
- (15) Numerics, 2021, *SPEED V4 User's Manual*, Ver. 4.1.2