

긴장력이 도입된 곡면벽체의 충돌저항성능 수치해석평가

정 철 헌¹ · 이 정 휘^{1*} · 정 래 영² · 유 태 용¹

¹단국대학교 토목환경공학과, ²한국원자력안전기술원 구조부지평가실

Assessment of Impact Resistance Performance of Post-tensioned Curved Wall using Numerical Impact Analysis

Chul-Hun Chung¹, Jungwhee Lee^{1*}, Raeyoung Jung² and Tae-Yong Yu¹

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea
²Structural Systems & Site Evaluation Dept. Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 34142, Korea

Abstract

In this study, the effect of wall curvature and post-tension force on impact resistance is evaluated by numerical analysis method. A total of twelve cases with two parameters such as wall shape of flat and curved, and consideration of post-tensioning force were included in this study. A 3D detailed finite element model of commercial passenger plane engine is utilized as projectile. The depths of penetration and central displacement calculated from the numerical simulations were compared and analysed. As the results of the numerical simulations of this study, penetration depth was reduced approximately 60~80% due to the application of post-tension force, but the decrease of maximum central displacement was not remarkable. Also, the effect of curvature was relatively insignificant.

Keywords : impact resistance, impact analysis, curvature, post-tension, penetration depth, maximum displacement

1. 서 론

원자력 발전소 격납구조물의 벽체 두께는 국부 충돌에 의해 발생하는 국부손상을 방지할 수 있는 두께로 설계하며, 기존에 제안된 국부손상 평가식을 적용하여 경험적 방법에 의해서 벽체 두께를 결정하고 있다. 하지만 현재 적용하고 있는 국부손상 평가식은 평면의 철근콘크리트(RC) 벽체를 대상으로 수행한 다수의 실험결과를 근거로 만들어진 것이며, 따라서 실제 격납구조물에 도입되어 있는 곡면형상 및 긴장력의 영향 등을 반영할 수 없다는 한계를 가지고 있다(Sliter, 1980; Kojima, 1991; Sugano *et al.*, 1993; Li *et al.*, 2003).

이러한 국부손상 평가식이 갖는 한계를 극복하기 위하여 최근에는 외연적 수치해석기법을 활용한 충돌시물레이션을 통하여 국부손상을 평가하는 연구가 진행된 바 있으며(Chung *et al.*, 2010), 충돌시물레이션 결과에 영향을 미치는 영향

인자 분석(Chung *et al.*, 2011), 충돌시물레이션의 결과와 충돌실험의 결과를 비교하여 시물레이션 정확도를 높이고자 하는 연구(Rambach *et al.*, 2011; Chung *et al.*, 2015) 등 수치해석기법을 활용한 충돌영향평가 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 벽체의 곡면형상 및 벽체에 도입되는 긴장력이 국부충돌 저항성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일련의 수치시물레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 수치시물레이션에는 외연적 수치해석 프로그램인 LS-DYNA(LSTC, 2007)를 사용하였으며, 충돌체로는 상용 민항기엔진의 3차원 상세모델을 사용하였다.

2. 대상 구조물 개요

이 연구에서 수치시물레이션의 대상으로 삼은 벽체는 Fig.

* Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3511; E-mail: jwhee2@dankook.ac.kr
Received November 2 2015; Revised November 9 2015;
Accepted November 10 2015

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1에 나타난 바와 같이 평면형과 곡면형의 두 가지이며, 벽체의 두께는 모두 1.37m이고, 곡면형 벽체는 22.86m의 내측 반경을 갖는다. 벽체 단면은 Fig. 2에 나타난 바와 같으며, 대상 벽체의 사양은 실제 원자력발전소 격납구조물의 형상을 고려하여 정하였다. 벽체의 크기는 가로, 세로 모두 14m로 하였으며, 이것은 충돌에 의한 영향범위를 충분히 포함할 수 있도록 사전해석을 통하여 정한 것이다. 실제로 격납구조물의 내부에는 라이너 플레이트가 시공되지만 본 연구는 곡률 및 긴장력의 영향을 파악하는 것이 주된 목적이므로 해석 모델에 라이너플레이트를 포함시키지 않았다.

벽체에 사용된 철근과 텐던의 사양 및 텐던의 유효응력을 Table 1에 나타내었다. 표에 수록된 유효응력은 마찰손실에 의한 텐던의 길이방향 긴장력의 차이를 고려하여 평균값을 취한 것이며, 구조물의 수명을 고려한 장기거동의 영향이 포함된 값이다.

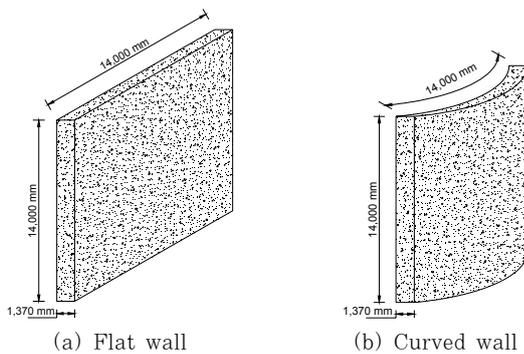


Fig. 1 Shapes of the objective structures

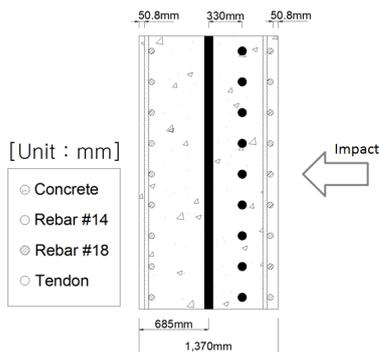


Fig. 2 Section view

Table 1 Rebar and tendon details

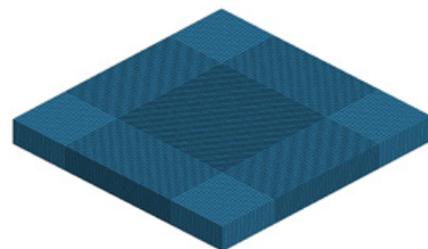
		Diameter (mm)	Area (mm ²)	Effective stress (MPa)
Rebar	#11	35.8	1006	-
	#14	43.0	1452	-
Tendon	Vertical	86.5	5880	993.6
	Hoop	86.5	5880	853.0

3. 유한요소 충돌해석

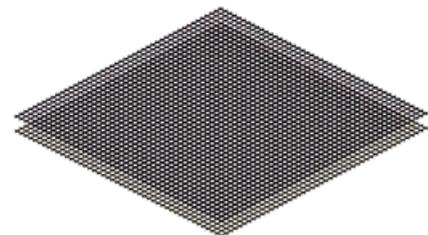
3.1 유한요소망 구성

대상 벽체의 콘크리트 부분은 8절점 solid요소를 사용하여 모델링하였으며, 엔진과의 충돌이 발생하는 중앙부는 해석의 정밀도를 위하여 보다 조밀한 요소망을 구성하였다. 중앙부의 요소 폭은 가로, 세로 모두 약 0.1m로 하였으며, 주변부는 약 0.2m로 구성되었다. 벽체의 두께방향으로는 10개 층으로 모델링하였다. 철근과 텐던은 Fig. 2에 표시된 사양을 반영하여 2절점 truss요소로 모델링하였다. 철근 및 텐던과 콘크리트부의 합성은 LS-DYNA에서 제공하는 "Constrained_lagrange_in_solid" 명령어를 사용하여 구현하였다. 이 경우 텐던 및 철근과 콘크리트가 완전합성거동을 하게 되어 비부착 텐던의 실제 거동과 차이가 나타날 수 있다. 최근 LS-DYNA에 추가된 *Constrained_beam_in_solid 명령어에서는 축방향 합성을 해제하는 기능을 제공하고 있으며, 축방향 합성여부가 충돌저항성능에 미치는 영향에 대하여 추가의 연구가 필요할 것으로 생각된다. 평판형 벽체와 곡률형 벽체의 유한요소망을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

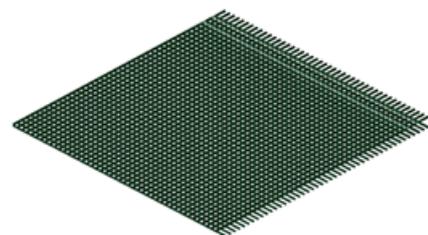
충돌체로 사용된 항공기 엔진의 유한요소 모델을 Fig. 5에



(a) Concrete part



(b) Rebars



(c) Tendons

Fig. 3 Flat wall model

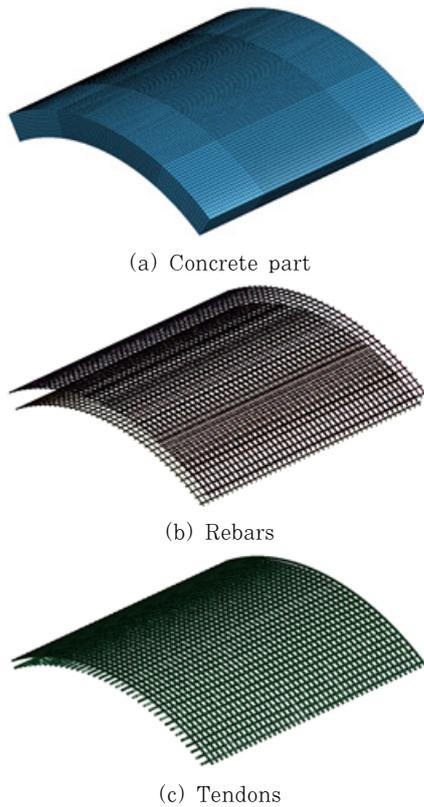


Fig. 4 Curved wall model

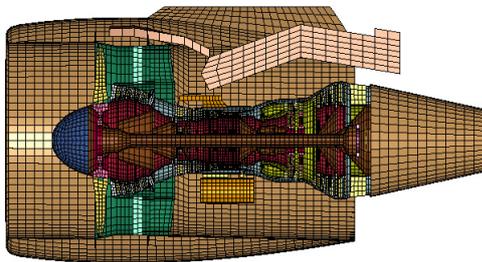


Fig. 5 Airplane engine model : Section view

나타내었다. 중심의 회전축(shaft)을 포함한 중앙부는 4절점 shell 요소와 8절점 solid 요소로 구성되어 있으며, 외곽부는 shell 요소로만 구성되어 있다. 엔진 모델은 실제 엔진의 형상 및 물성을 최대한 반영하여 구성하였다.

3.2 재료모델

콘크리트 부분에는 *MAT_CSCM_CONCRETE, 철근과 텐던에는 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC, 항공기 엔진에는 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 재료모델이 각각 사용되었다.

CSCM concrete 재료모델(Murray, 2007)은 비교적 최근에 개발된 모델로 콘크리트의 비선형 재료거동을 포함하고

Table 2 Material model input parameters

Part	Category	Value
Concrete	Mat. model	*MAT_CSCM_CONCRETE
	Input parameters	$\rho = 2300 \text{kg/m}^3$ $d_{agg} = 19 \text{mm}$ $f_{ck} = 41.37 \text{MPa}$ $erode = 1.4$
Rebar	Mat. model	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
	Input parameters	$E = 199.9 \text{GPa}$ $\nu = 0.3$ $f_y = 413.7 \text{MPa}$ $\epsilon_{fail} = 0.15$
Tendon	Mat. model	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
	Input parameters	$E = 193.1 \text{GPa}$ $\nu = 0.3$ $f_y = 1655 \text{MPa}$ $\epsilon_{fail} = 0.15$
Engine	Mat. model	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
	Input parameters (MAT 1)	$\rho = 2146 \text{kg/m}^3$ $\nu = 0.33$ $E = 72 \text{GPa}$
	Input parameters (MAT 2)	$\rho = 8111 \text{kg/m}^3$ $\nu = 0.35$ $E = 200 \text{GPa}$
	Input parameters (MAT 3)	$\rho = 8672 \text{kg/m}^3$ $\nu = 0.35$ $E = 207 \text{GPa}$
	Input parameters (MAT 4)	$\rho = 4572 \text{kg/m}^3$ $\nu = 0.35$ $E = 114 \text{GPa}$

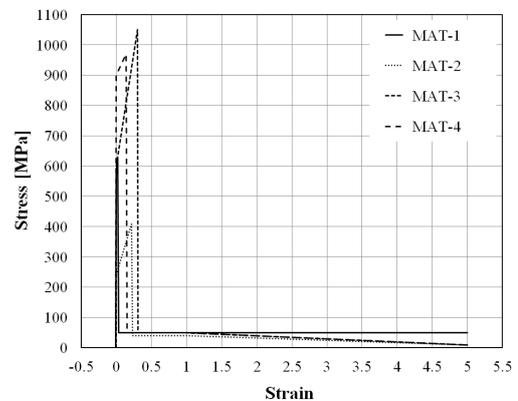


Fig. 6 Stress-strain curve of engine materials

있으며, strain rate 효과 및 erosion 기능을 포함하고 있어 본 연구와 같은 충돌 시뮬레이션에 빈번히 적용되고 있다. Table 2에 나타난 바와 같이 밀도, 1축 압축강도(f_{ck}) 및 골재치수를 입력하도록 되어 있으며, 탄성계수 등 물성은 내부적으로 생성된다. erosion parameter 입력값은 1.4를 적용하였는데, 이 값은 여러 참고문헌의 실험자료를 사용하여 관입깊이에 대한 calibration 해석을 수행한 뒤 결정된 것이다(KINS, 2009).

철근 및 텐던은 탄성-완전소성 거동으로 가정하였으며, 항복 후 탄성계수를 0으로 입력하였다. strain rate 효과를 반영하기 위하여 사용되는 Cowper-Symonds 모델의 입력변수

C와 p는 강재에 일반적으로 사용되는 값인 40과 5로 각각 입력하였다(Su *et al.*, 1995).

항공기 엔진 모델에는 총 4종의 재료물성이 사용되었으며, Piecewise linear plasticity 모델을 사용하여 항복 후 비선형거동을 모사할 수 있도록 하였다.

Table 2에 모델에 사용된 각 재료 모델의 주요한 입력값을 정리하여 수록하였으며, 엔진에 사용된 재료모델의 응력-변형률 선도를 Fig. 6에 나타내었다.

3.3 경계조건 및 프리스트레싱 도입

전술한 바와 같이 충돌의 영향면적을 고려하여 벽체의 크기는 가로, 세로 각각 14m로 정하였으며, 네 변의 모든 절점을 고정하여 완전고정 조건을 적용하였다.

텐던의 프리스트레싱 도입을 위하여 온도하중에 대한 해석을 1단계로 수행하였으며, 프리스트레싱에 의한 인장응력이 텐던요소에 도입되기 위한 온도변화량을 계산하여 텐던 요소에 온도하중을 재하하였다. 온도하중에 의하여 계산된 모든 요소의 변위, 변형률 및 응력 결과 중 변위를 제외한 변형률과 응력 해석결과를 초기조건으로 하여 2단계의 충돌해석을 수행하였다. 수평방향 텐던이 단면의 도심에 배치되어 있지 않기 때문에 프리스트레싱 도입에 의해 벽체의 변형이 소량 발생되지만, 충돌해석 시에는 이를 고려하지 않고 초기의 절점 위치로 복원시킨 뒤 응력과 변형률 초기 조건만을 고려한 해석을 수행하였다.

3.4 수치해석 케이스 및 접촉조건

수치해석 케이스는 크게 평면형과 곡면형의 두 그룹으로 구성되며, 각 그룹은 긴장력의 도입 비율에 따라 아래 Table 3과 같이 6단계로 나뉜다. 긴장력 도입비율은 Table 1에 나타난 텐던의 유효긴장응력에 대한 도입비율을 나타낸다. 따라서 총 12 케이스에 대한 충돌해석을 수행하였다.

접촉조건은 모두 세 가지로 정의하여 사용하였는데, 첫

Table 3 Numerical analysis cases

Case ID	Wall shape	Pre-stressing ratio	Case ID	Wall shape	Pre-stressing ratio
F-0	Flat	0%	C-0	Curved	0%
F-20		20%	C-20		20%
F-40		40%	C-40		40%
F-60		60%	C-60		60%
F-80		80%	C-80		80%
F-100		100%	C-100		100%

번째는 엔진 내부 부품들 사이의 접촉, 두 번째는 엔진과 벽체 사이의 접촉, 그리고 마지막은 엔진과 벽체 내부의 truss 요소들(철근 및 텐던) 사이의 접촉을 위한 것이다. 각각에 사용된 명령어는 *Contact_Automatic_Single_Surface, *Contact_Automatic_Surface_to_Surface, *Contact_Automatic_Nodes_to_Surface이다.

3.5 해석결과

국부충돌에 의해 벽체에 발생하는 손상은 관입, 스캐빙 및 관통으로 구분하며, Fig. 7에 나타난 바와 같다. 본 연구의 해석에서는 모든 12 케이스에서 관입 형태의 손상이 발생되었다.

충돌저항성능의 평가를 위하여 충돌부위의 최대 관입깊이와 벽체 후면 중앙부의 최대 변위를 비교하였다.

관입깊이는 Fig. 8에 나타난 x를 뜻하며, 충돌체와 벽체의 충돌에 의해 충돌체가 벽체 안쪽으로 뚫고 들어간 깊이를 나타낸다. 본 해석에서는 엔진을 구성하고 있는 부품 중 비교적 강성이 큰 회전축(shaft)에 의해 최대 관입이 발생되었다.

최대 변위는 콘크리트 벽체의 충돌 반대쪽 표면에서 발생한 최대 변위를 뜻한다. 본 해석에서 최대 변위는 벽체의 중앙에서 발생하였다.

Fig. 9 및 Fig. 10에 평판형 및 곡률형 벽체의 긴장력 0% 및 100%인 경우에 얻어진 변형 형상을 나타내었으며, Table 4에는 모든 케이스에서 얻어진 최대 관입깊이와 최대 변위를 수록하였다.

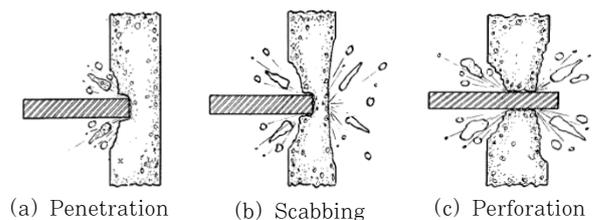


Fig. 7 Category of local damage(Kennedy, 1976)

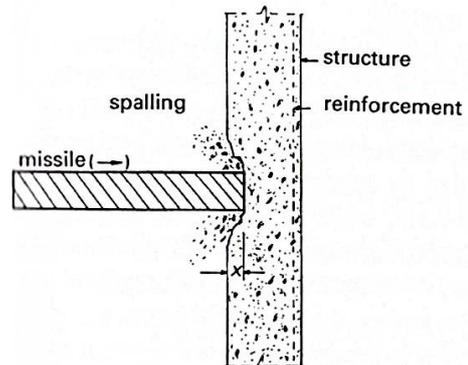


Fig. 8 Penetration depth(Bangash, 1993)

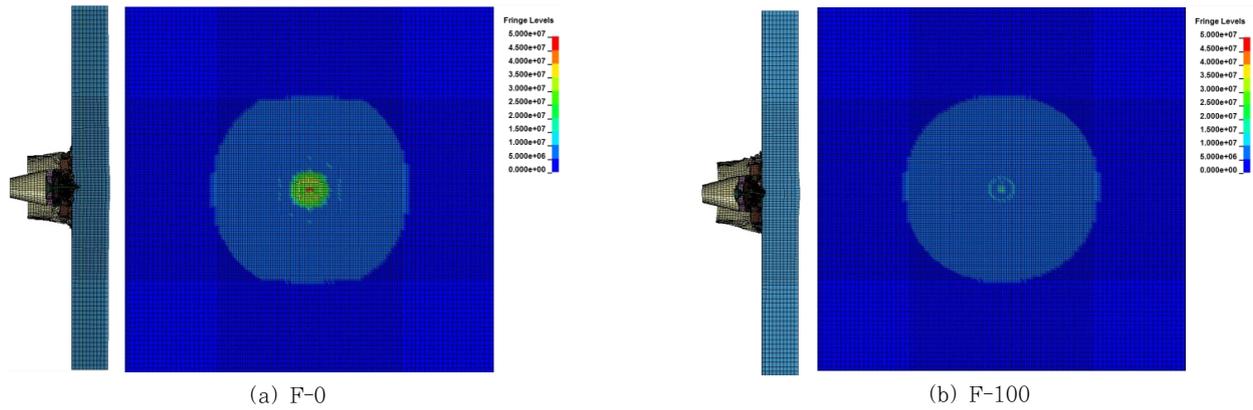


Fig. 9 Deformed shapes of flat walls

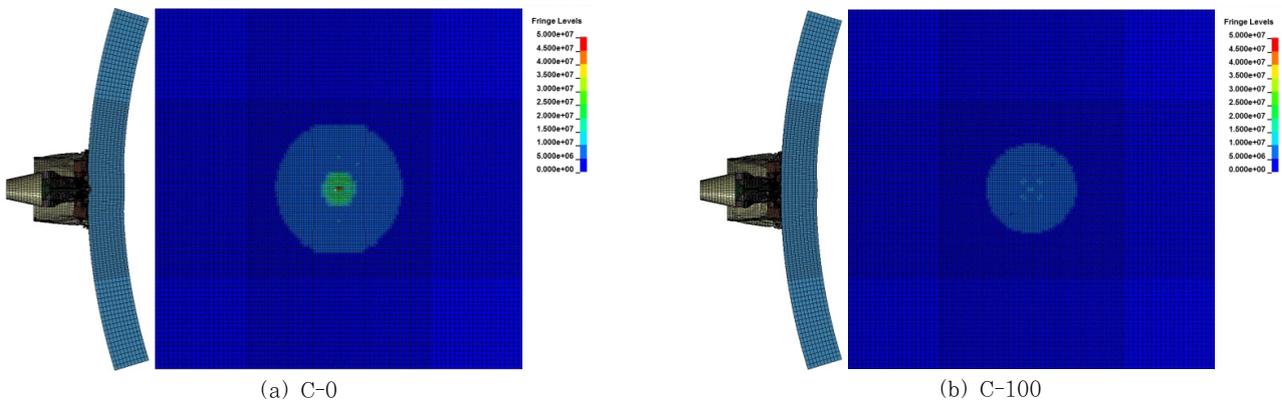


Fig. 10 Deformed shapes of curved walls

Table 4 Numerical analyses results summary

Case ID	Max. penetration depth (mm)	Max. deformation (mm)
F-0	155.98	105.71
F-20	153.89	69.31
F-40	116.17	60.97
F-60	64.95	63.61
F-80	72.84	54.82
F-100	57.41	53.16
C-0	147.94	69.69
C-20	124.78	65.72
C-40	92.31	52.61
C-60	33.23	69.08
C-80	27.51	45.15
C-100	26.72	53.20

4. 해석 결과 분석

4.1 긴장력 도입 효과

긴장력 도입에 따른 평면형 벽체와 곡면형 벽체에 발생한 최대 관입깊이의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 긴장률 증가에 따라 최대 관입깊이가 감소하는 경향이 뚜렷하게 관찰되었

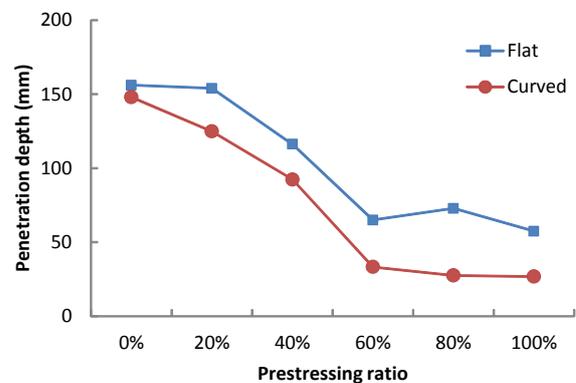


Fig. 11 Comparison of penetration depth

으며, 유효 긴장응력의 100%가 도입되었을 때의 관입깊이의 감소율은 평판형 벽체와 곡률형 벽체에서 각각 63.2%와 81.9%로 나타나 곡률형 벽체에서 더 큰 감소율을 나타내었다. 관입깊이의 감소는 긴장률 60%까지 뚜렷하게 나타났으며, 긴장률 60% 이후에는 관입깊이의 감소가 거의 나타나지 않았다. 긴장력이 도입되지 않은 경우(F-0 및 C-0)는 벽체 형상에 따른 관입깊이의 차이가 거의 나타나지 않았으나, 긴장력의 도입이 진행됨에 따라 곡률형 벽체에서 더 작은 관입 깊이를 나타내었다.

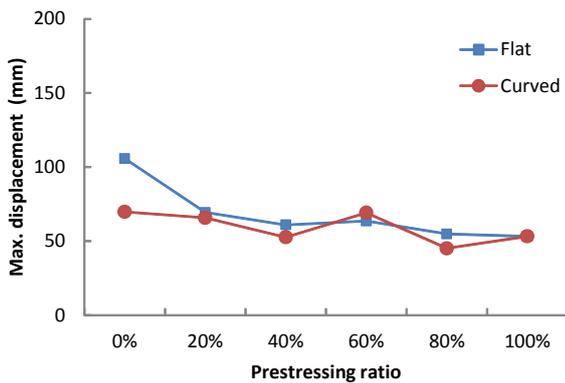


Fig. 12 Comparison of maximum displacement

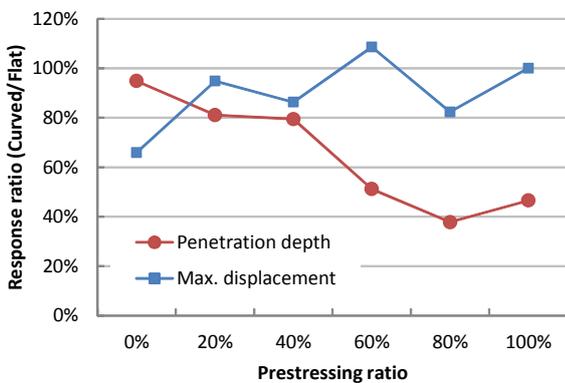


Fig. 13 Response ratios between flat and curved walls

평면형 벽체와 곡면형 벽체에 발생한 최대 후면변위는 Fig. 12에 나타내었다. 긴장률이 증가함에 따라 후면변위가 다소 감소하는 경향을 나타내기는 하지만 관입깊이에 비하면 최대 변위 감소는 크지 않은 것으로 판단된다.

4.2 벽체곡률의 영향

평면형 벽체와 곡면형 벽체의 충돌저항성능을 비교하기 위하여 두 벽체의 응답비를 계산하여 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 11에서도 나타난 바와 같이 관입깊이의 경우는 곡면형 벽체에 발생한 관입깊이가 평면형 벽체에 비하여 전체적으로 더 작으며, 그 차이는 긴장률 증가에 따라 대체적으로 증가하는 것으로 나타났다. 가장 차이가 큰 경우는 긴장률 80%일 때로, 곡면형 벽체의 관입깊이가 평면형 벽체의 관입깊이의 약 40% 수준이다.

하지만 후면 최대변위의 경우는 Fig. 12에서도 확인할 수 있는 바와 같이 긴장력이 도입되지 않은 경우(F-0 및 C-0)는 곡면 벽체가 평면 벽체에 비하여 약 65.9% 수준의 작은 후면변위를 나타내었으나 긴장력이 도입된 이후에는 평면 벽체와 곡면 벽체의 응답 사이에서 큰 차이가 나타나지 않았으며, 긴장률 증가에 따른 경향도 나타나지 않았다.

5. 결 론

이 연구에서는 외연적 수치해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 긴장력이 도입된 평면 및 곡면 프리스트레스트 콘크리트 벽체와 항공기 엔진의 충돌해석을 수행하고, 이로부터 긴장력의 도입 및 벽체의 곡률이 벽체의 충돌저항성능에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 긴장력의 도입에 의해 벽체의 충돌저항성능이 증가하며, 이로 인하여 관입깊이 및 최대변위가 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 특히 관입깊이에서 더욱 두드러지게 나타났으며, 긴장률 60% 수준까지 관입깊이의 감소가 뚜렷하게 나타났다.
- 2) 평면형 벽체와 곡면형 벽체의 응답을 비교하여 벽체 곡률의 영향을 파악하였다. 관입깊이의 경우는 평면형 벽체에 비하여 곡률형 벽체의 관입깊이가 더 작게 나타나 벽체의 곡률이 관입깊이 감소에 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 하지만 최대 변위의 경우는 벽체 곡률의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

이러한 결과로부터, 긴장력 및 곡률의 영향이 고려되지 않은 기존의 국부손상 평가식을 긴장력이 도입된 곡면 벽체의 설계에 적용할 경우 과다설계의 결과를 가져올 수 있음을 확인하였다.

또한, 향후 개선된 국부손상 평가식의 개발을 위해서는 보다 다양한 변수해석 및 실험이 뒷받침 되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(원자력안전위원회)의 재원으로 한국방사선안전재단-원자력안전연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 1305001).

References

- Chung, C.H., Choi, H., Lee, J.W., Choi, G.R. (2010) Evaluation of Local Effect Prediction Formulas for RC Slabs Subjected to Impact Loading, *J. Korean Soc. Civil. Eng.*, 30(6A), pp.543~560.
- Chung, C.H., Lee, J.W., Kim, S.Y., Lee, J.H. (2011) Influencing Factors on Numerical Simulation of Crash between RC Slab and Soft Projectile, *J.*

- Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(6), pp.591~599.
- Sliter, G.E.** (1980) Assessment of Empirical Concrete Impact Formulas, *J. Struct. Div.*, ASCE, 106(5), pp.1023~1045.
- Kojima, I.** (1991) An Experimental Study on Local behavior of Reinforced Concrete Slabs to Missile Impact, *Nucl. Eng. & Des.*, 130(2), pp.121~132.
- Korea Institute of Nuclear Safety(KINS), Dankook Univ.** (2009) Evaluation and Assess Procedure of the Aircraft Impact, Research Report, KINS/HR-986.
- Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Ohnuma, H., Riesemenn, von W.A., Bickel, D.C., Parks, M.B.** (1993) Full-scale Aircraft Impact Test for Evaluation of Impact Force, *Nucl. Eng. & Des.*, 140(3), pp.373~385.
- Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Ohnuma, H., Riesemenn, von W.A., Bickel, D.C., Parks, M.B.** (1993) 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), pp.387~405.
- Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Ohnuma, H., Riesemenn, von W.A., Bickel, D.C., Parks, M.B.** (1993) Local Damage to Reinforced Concrete Structures caused by Impact of Aircraft Engine Missiles Part 2. Evaluation of Test Results, *Nucl. Eng. & Des.*, 140(3), pp.407~423.
- Li, Q.M., Chen, X.W.** (2003) Dimensionless Formulae for Penetration Depth of Concrete Target Impacted by a Non-deformable Projectile, *Int. J. Impact Eng.*, 28(1), pp.93~116.
- Chung, C., Lee, J., Jung, R.** (2015) Numerical Simulations of Missile Impacts on Reinforced Concrete Plates: IRIS-2010/2012 Benchmark Project, *Nucl. Eng. & Des.*, 295, pp.747~758.
- Rambach, J.-M., Orbovic, N., Tarallo, F.** (2011) IRIS 2010-Part I: General Overview of the Benchmark. SMiRT 21, Div-V, New Delhi, India (Paper ID #147).
- LSTC** (2007) *LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971.*, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore.
- Murray, Y.D.** (2007) *User Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159*, Report No. FHWA-HRT-05-062, Federal Highway Administration.
- Su, X.Y., Yu, T.X., Reid, S.R.** (1995) Inertia-Sensitive Impact Energy-Absorbing Structures Part II : Effect of Strain Rate, *Int. J. Impact Eng.*, 6(4), pp.673~689.
- Bangash, M.Y.H.** (1993) *Impact and Explosion : Analysis and Design*, Blackwell Scientific Publications.
- Kennedy, R.P.** (1976) A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects, *Nucl. Eng. & Des.*, 37, pp.183~203.

요 지

이 논문에서는 벽체의 형상(평면벽체, 곡면벽체) 및 벽체에 도입된 긴장력이 충돌저항성능에 미치는 영향을 수치해석적 기법을 사용하여 평가하고자 하였다. 벽체의 곡률 및 긴장력 도입률을 변수로 총 12 케이스의 충돌해석을 수행하였으며, 충돌체로는 상용 민항기엔진의 3차원 상세모델을 사용하였다. 충돌저항성능을 평가하기 위해 관입깊이와 벽체 중앙부 후면의 최대 변위를 비교하였다. 긴장력의 도입에 의해 관입깊이는 약 60~80% 수준으로 감소하는 것으로 나타났으나, 후면 변위는 큰 차이가 나타나지 않았으며, 벽체 형상에 따른 차이는 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 충돌저항성능, 충돌해석, 곡률, 긴장력, 관입깊이, 최대변위