

근접폭발하중에 대한 구조물해석 최근 연구동향

A Recent Trend in Analysis of Structures for Near-field Blast Loading



이 경 구*
Lee, Kyung-Koo



신 진 원**
Shin, Jin-Won

1. 폭발 하중의 선정

공중 폭발 하중 (air-blast loading)의 효과는 중요건물들 (mission-critical buildings), 사회기반 시설 (infrastructure), 그리고 교량의 설계에 일반적으로 고려된다. 방폭 설계를 위한 지침서로는 DoD (2008), Dusenberry (2010), ASCE (2011) 등이 있다. 하지만 대부분의 설계 기법이 원거리 (far field) 폭발 하중에 대해서만 기술되어 있다. 이 문서들은 구조물에 대한 공중 폭발 하중, 즉, 입사 및 반사 초과압력 과 충격량을 계산하는데 쓰이는 경험적/실험적 차트를 제공하는데, 이 차트들은 근거리 (near field)에 대해서는 검증되지 못하였다. 그 이유는 폭발 근처, 즉 파이어볼 내부에서의 높은 온도와 압력으로 인하여 현재 상업적으로 이용 가능

한 압력변환기로는 그 압력에 대한 직접적인 측정이 불가능하기 때문이다. 현재 차트에서 제공되는 대부분의 근거리 데이터는 실험적으로 증명된 원거리 데이터를 기반으로 우회적으로 유도/추측된 값들이 대부분이다.

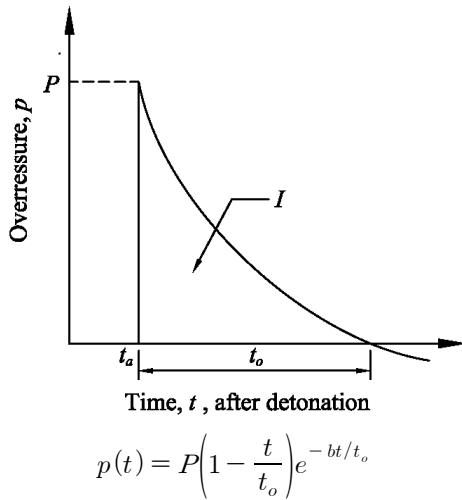
〈Fig. 1〉은 일반적으로 사용되는 폭발하중이력과 그것을 결정하는 Friedlander 식을 보여준다. 폭발하중 변수들의 값들은 〈Fig. 2〉에 제시된 전세계적으로 널리 사용되는 UFC 차트 (DoD 2008)를 이용하여 얻어진다. 변수들의 값들은 축척 거리 (scaled distance), Z , 에 의하여 결정이 되며 $Z (= R/W^{1/3})$ 는 폭발의 중심으로 부터의 거리 R 과 폭발물의 질량 W 에 의해 결정된다. 여기서 근거리란 축척 거리 Z 의 값이 작은 경우를 말한다.

지난 수십년간, 컴퓨터 유체 역학 코드 (CFD code)의 급속한 발전은 복잡한 폭발 현상의 시뮬레이션을 가능하게 하였다. 주로 사용되는 코드로는

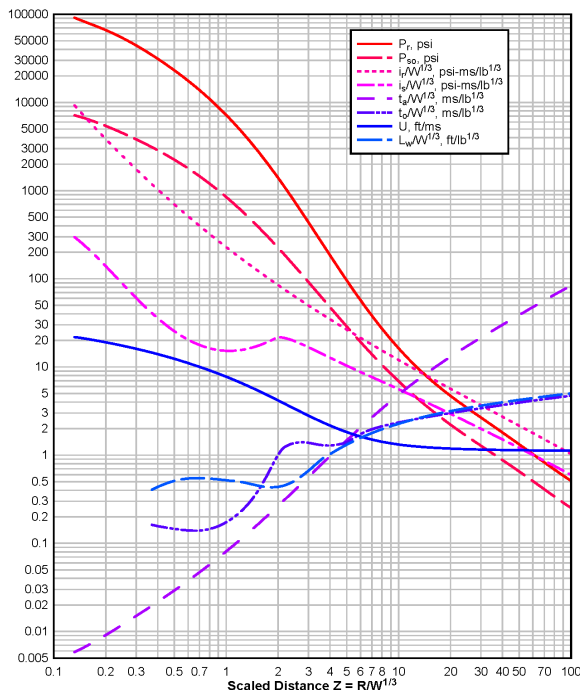
* 교수·단국대학교 건축공학과

** 연구교수·단국대학교 건축공학과

LS-DYNA, AUTODYN, Air3D 등이 있다. 이 코드 들은 폭발 해석에 대하여 검증 (verification)되고 확인 (validation)되어왔고, 구조 안전 설계에서의 주 관심사인 근접 폭발에 대하여 기존의 경험적인 설계 차트에 대한 심도 있는 검토를 가능하게 한다.



〈Fig. 1〉 Blast pressure-time curve



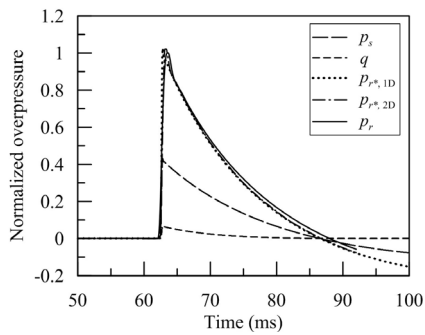
〈Fig. 2〉 Design chart in UFC 3-340-02

2. 방폭 해석 동향

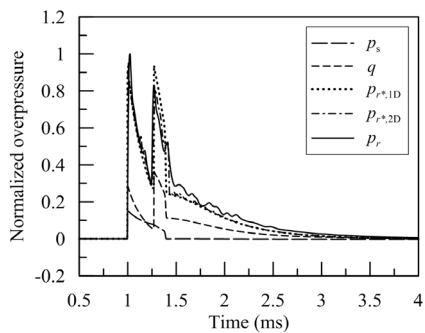
방폭 설계에 대한 연구는 대체로 두가지 방향, 즉 1) 앞서 언급된 경험적/실험적 차트와 단순화된 폭발하중이력, 그리고 단자유도 (SDOF) 해석과, 2) CFD와 유한요소법 (FEM)을 이용한 전산해석이다.

〈Fig. 2〉의 차트는 미국, 영국, 오스트레일리아를 비롯하여 전 세계적으로 널리 쓰이는 폭발 하중 설계차트이고, UFC 3-340-02 (DoD 2008)와 같은 미국정부문서에 의해 제공된다. 이 차트의 데이터들은 공중에서 구형의 폭발과 지표면에서의 반구형의 폭발 대한 입사 및 반사 초과압력 및 충격량, 충격파의 속도, 정압 단계 (positive phase) 기간의 값들과 함께 〈Fig. 1〉의 폭발 하중 이력의 변수들에 대한 데이터를 제공한다. 〈Fig. 2〉에서 제시된 차트는 수직 입사에 관한 데이터를 제공한다. 입사각에 따른 반사 초과압력과 충격량에 관한 데이터 역시 차트로 제공된다.

원거리 폭발의 실제 압력 이력은 〈Fig. 1〉과 같이 표현되며 그 충격파를 평면파 (planar wave)로 가정할 수 있어 구조물에 등분포 하중으로 단순화시켜 해석이 가능하다. 하지만 이러한 방법은 근거리 폭발에 대해서는 적용이 불가능하다. 근거리에서는 구조물의 표면에 폭발 중심으로부터의 거리와 각도에 따라 압력 차이가 매우 크고 〈Fig. 1〉에서의 이상적인 곡선형태도 적용될 수 없다. 〈Fig. 3〉과 〈Fig. 4〉는 원거리와 근거리, 즉 축적 거리들 $Z = 4$ 와 $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에서의 초과압력 이력에 대한 수치해석 결과이다. 여기서 원거리, 즉 〈Fig. 3〉에서의 반사 초과압력 (p_r) 곡선모양은 〈Fig. 1〉에서의 곡선과 매우 유사하지만 〈Fig. 4〉 곡선과는 상당한 차이를 보인다, 여기서 대략 1.3 ms 에서 압력증가는 폭발 초기에 팽창하는 폭발물의 영향 때문이다. 이 영향은 대략 $Z = 0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 까지 유효하며 이후에 초과압력 이력에는 영향을 주지 않는다.



〈Fig. 3〉 Overpressure history at $Z = 4$ $\text{m/kg}^{1/3}$



〈Fig. 4〉 Overpressure history at $Z = 0.4$ $\text{m/kg}^{1/3}$

폭발의 CFD 해석에는 유한차분법 (FDM)이 주로 사용된다. 폭발물의 모델링에는 BKW, JWL, KHT 등의 상태방정식 (EOS)이 사용된다. 이 상태방정식들은 유체에서의 압력, 부피, 밀도, 내부 에너지들의 관계를 정의하며, 이중에 JWL EOS가 그 사용의 편의성과 정확도 때문에 주로 사용된다.

폭발 압력을 받는 구조물의 해석은 간단히 단자유도법을 사용하거나 조금더 상세하게는 유한요소법 (FEM)을 사용한다. 폭발압력을 받는 구조 요소의 응답을 해석하기 위하여 응력, 변형, 변형률, 온도의 관계를 정의하는 구성모델이 필요한데, 금속 재료에 대해서는 대표적으로 Johnson and Cook (1983) 모델이 사용되고, 콘크리트 재료에 대해서는 Malvar and Ross (1998), Hao and Zhou (2007) 등의 모델들이 사용된다.

근거리 폭발 압력을 받는 콘크리트 구조물의 경우, 재료가 파괴되어 콘크리트의 심각한 파쇄를 받

생 시킬 수 있다. 이러한 데미지 또한 erosion 알고리즘에 의해서 시뮬레이션 된다. 이 알고리즘은 유한요소모델의 요소들이 미리 정의된 변수의 값이나 파괴에너지 (fracture energy)가 한계치에 도달시 그 요소들을 삭제한다. Erosion은 유한요소 코드인 ABAQUS, AUTODYN, 그리고 LS-DYNA에서 구현되지만 단자유도해석에서는 사용될 수 없다.

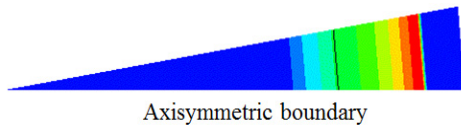
아래에는 경험적/실험적으로 도출될 수 없었던 근거리 폭발 효과 그에 대한 구조물의 응답을 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 사용한 해석에 대하여 자세히 기술하였다.

3. 폭발 CFD 해석

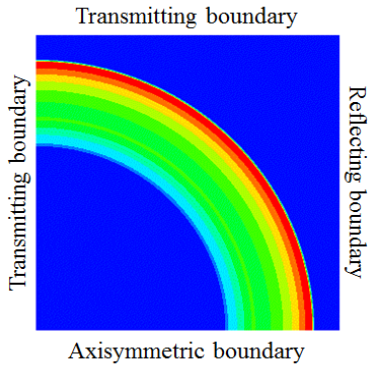
폭발 해석을 위한 CFD 코드로 AUTODYN이 사용되었고, 구형 TNT의 공중 폭발에 대하여 해석하였다. TNT는 JWL EOS를 사용하여 모델링되었고, 공기는 이상기체 (ideal gas)로 모델링되었다. 폭발 후 재연소 (afterburning)는 고려되지 않았는데, 구속이 없는 폭발의 경우 폭발물의 남은 연료가 폭발 후 주변의 산소와 잘 결합하지 않기 때문이다.

입사 초과압력과 충격량의 시뮬레이션은 〈Fig. 5〉에서 보이듯이 축대칭 (axial symmetry)을 사용한 1차원 (1D)의 도메인에서 수행된다. 반사 초과압력과 충격량은 〈Fig. 6〉에서 보이듯이 2차원 (2D)에서 시뮬레이션 된다. 여기서 2D 해석에 있어서, 전산 비용을 최소화하기 위하여 충격파가 반사되기 전까지의 1D 결과를 2D로 옮겨 (mapping) 사용한다.

입사 및 반사 초과압력 및 압력이 축적거리 $0.0553 \leq Z \leq 8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 범위에 대하여 시뮬레이션 되었다. 폭발물의 무게로는 22.68, 960 그리고 18735 kg 이 사용되었고 계산된 폭발 압력 및 축적 변수들은 폭발물의 무게와 상관없이 일정하였다.



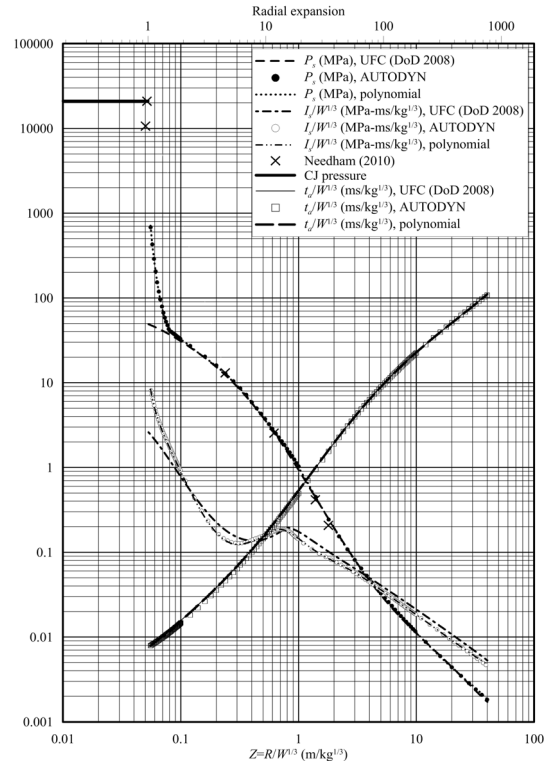
〈Fig. 5〉 AUTODYN 1D analysis



〈Fig. 6〉 AUTODYN 2D analysis

4. CFD 해석 결과 및 새 차트의 제안

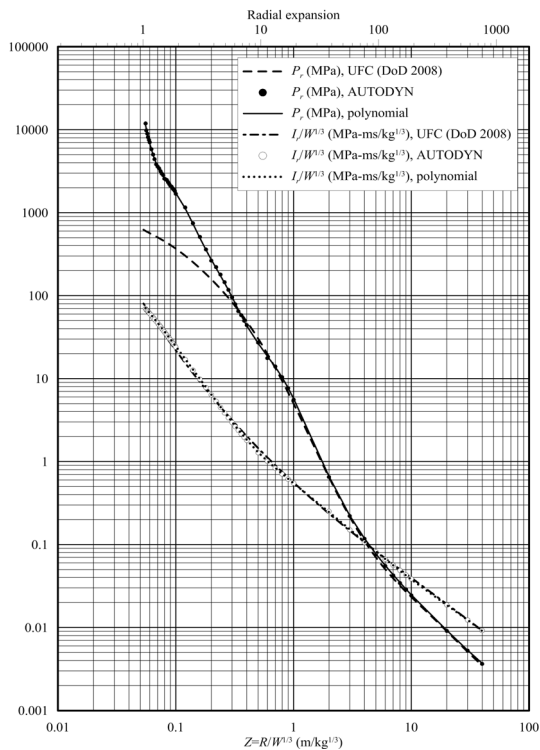
〈Fig. 7〉은 UFC 차트와 비교하여 입사 최대 초과압력 (incident peak overpressure, P_s), 입사 축적 충격량 (incident scaled impulse, $I_s/W^{1/3}$), 그리고 축적 도달시간 (scaled arrival time, $t_o/W^{1/3}$)에 대한 수치해석 결과를 보여준다. AUTODYN을 사용하여 계산된 입사 최대 초과압력은 $Z < 0.08 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에 대하여 UFC 예측보다 10% 이상 크다. 이는 작은 축적거리에서 UFC 차트를 만들기 위해 사용된 데이터들이 충격파에 대한 영향만을 고려하고, 〈Fig. 4〉와 관련하여 언급된 근거리에서 폭발물의 물리적 팽창에 관한 효과를 고려하지 않았기 때문이다. 상대적으로 큰 축적거리, 즉 $Z > 0.08 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 범위에서는 수치해석결과와 UFC 예측이 매우 유사하였다. 입사 축적 충격량의 경우, 비슷한 이유로 $Z < 0.1 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에 대하여 수치해석 결과가 UFC 예측보다 3.5배까지 크다. 이후 $Z > 0.1 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 범위에서는 전반적으로 10%에서 20% 정도의 차이를 보였다. 충격파의 도달시간에 대해서는 고려된 모든 축적거리에 대하여 그 결과가 매우 유사하였다.



〈Fig. 7〉 Incident peak overpressure and scaled impulse and scaled arrival time

〈Fig. 8〉은 수직 반사 최대 초과압력 (normally reflected peak overpressure, P_r)과 반사 축적 충격량 (reflected scaled impulse, $I_r/W^{1/3}$)에 대한 결과를 보여준다. 반사 최대 초과압력에 대하여 수치해석결과가 $Z < 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 의 범위에서 UFC 차트의 예측보다 상당히 높은 값을 보였다. 반면, $Z > 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에서는 큰 차이가 없었다. 반사 축적 충격량에 대해서는 수치해석 결과와 UFC 차트의 예측이 고려된 모든 축적거리 범위에서 매우 유사하였다.

〈Fig. 7〉과 〈Fig. 8〉에서 보이듯이 각 변수에 대한 수치해석결과를 바탕으로 고차원 다항식 (polynomials)이 제안되었다. 이는 구조물의 방폭 설계와 해석에 있어, 특히 근거리에서, UFC 차트보다 더 정확한 예측을 가능하게 한다. 〈Fig. 7〉에서의 Needham (2010)의 데이터는 참고적으로 포함되었다.

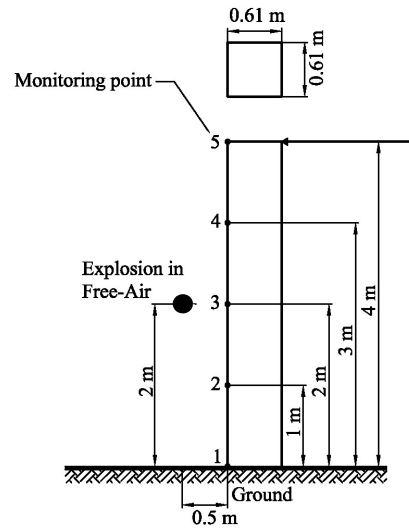


〈Fig. 8〉 Normally reflected peak overpressure and scaled impulse

5. 근접폭발에 대한 구조물의 해석

방폭 구조 설계의 주요 관심사는 근거리 혹은 작은 축적거리에서 높은 폭발 압력을 받는 구조물에 대한 안전설계이다. 이러한 높은 압력과 충격량은 구조물의 요소들에 극심한 데미지를 입힌다. 콘크리트의 경우 심각한 파쇄로 이어지고 이는 구조물의 (연쇄)붕괴로 이어진다.

이러한 방폭 연구에 관련, 비용문제로 실험이 매우 힘들지만 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해석은 상대적으로 이러한 연구를 손쉽게 가능하게 한다. 본 연구에서는 〈Fig. 9〉에서 보이는바와 같이 철근 콘크리트 기둥과 기둥으로부터 0.5 m, 지상으로부터 2m 떨어져있는 TNT 20kg의 폭발에 대한 연구가 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 수행되었다. 기둥과 폭발물간의 축적거리 Z는 $0.19 \text{ m/kg}^{1/3}$ 이다. 폭발하중은 AUTODYN을 사용하여 그림에서 보이듯이 5개의 관측지점 (monitoring location)에서 초과압력-시간 이력이 계산되었고, 이 데이터는 기둥

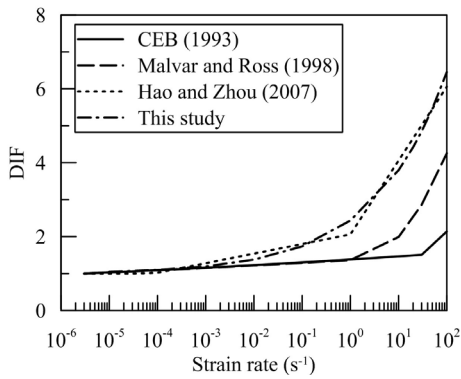


〈Fig. 9〉 RC column subjected to near-field explosion in free air

에 작용하는 폭발하중으로 사용되었다.

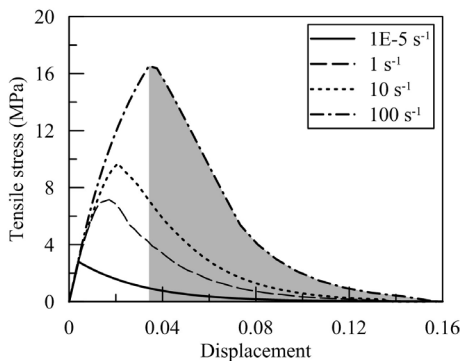
RC 기둥은 유한요소코드인 LS-DYNA를 사용하여 모델링 되었다. 콘크리트는 방폭/충격 해석에 자주 사용되는 재료모델인 CSCM을 사용하였고, 철근은 Johnson and Cook 모델을 사용하여 모델링 되었다. 콘크리트의 점소성 (viscoplastic) 데미지 모델인 CSCM을 정의함에 있어서 압축 및 인장강도에 대한 변형 속도 (strain rate)의 영향, 메쉬의 크기와 관련한 변형률 연화 (strain softening)효과, 그리고 파괴에너지를 수반하는 데미지 알고리즘을 고려하였다.

폭발 및 고속충돌해석에서는 재료에 대한 변형 속도의 영향이 매우 중요하다, 즉 변형 속도의 증가와 함께 재료의 강도가 증가한다. 이는 동적증가계수 (DIF)에 의하여 구현되는데, 〈Fig. 10〉은 제안되어왔던 인장강도에 대한 DIF들을 보여준다. 각각의 제안된 DIF들은 실험적/통계적으로 얻어진 값들이다. 준 정적 (quasi static) 상태에서의 DIF는 1이다. 여기서는 가장 최신 자료인 Hao and Zhou (2007)의 DIF 값들이 본 연구에서의 CSCM에 적용되었다. 압축강도에 대해서는 CEB (1993)의 DIF가 사용되었다.



〈Fig. 10〉 DIF factors for tensile strength of concrete

〈Fig. 11〉은 35.5 MPa 콘크리트의 변형 속도에 따른 응력-변위 관계를 보여준다. 변형 속도의 증가에 따라서 인장강도, 최대 인장강도에 대한 변형률, 최대 변형률, 그리고 파괴에너지 모두 증가한다. 음영으로 표시된 부분은 변형속도 100s^{-1} 에 대한 파괴 에너지를 보여준다.

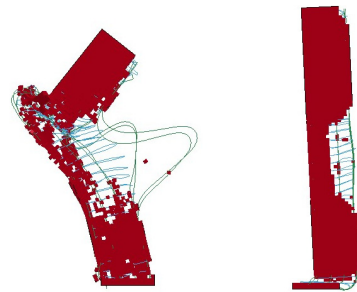


〈Fig. 11〉 Tensile capacity varying of concrete strain rate

콘크리트 파쇄를 모델링하는데 있어서 erosion이 종종 고려가 되는데, 이는 앞서 이야기한 데미지 알 고리즘 혹은 erosion strain을 사용하여 시뮬레이션 된다. 정의된 데미지 변수나 erosion strain이 한계값에 도달시 메쉬의 요소를 삭제함으로써 콘크리트의 파괴를 구현하는 방식이다.

이제까지의 많은 방폭 및 충돌 시뮬레이션 연구에서 콘크리트의 파괴를 모델링하기 위하여 편의상 erosion strain을 사용해왔다. Erosion strain의

값들은 대부분 실험 결과를 바탕으로 정의되어 왔다. 하지만 이 값들을 정의함에 있어 어떠한 이론적 근거가 제시되지 못하였기 때문에 erosion strain의 값을 이론적/분석적으로 유도함으로써 해석이 진행되었다. 폭발하중을 받는 콘크리트의 파괴는 주로 인장 응력으로 인하여 일어나기 때문에 erosion strain으로서 주인장변형률 (principal tensile strain)이 사용되었다. 기둥에 축하중을 적용하기 위하여 ACI 318-11 (ACI 2011) 규준에 의거 기둥 상부에 0.1, 0.2 그리고 $0.4f'_c$ 의 압력을 가하였다, 여기서 f'_c 는 콘크리트의 압축 강도이다. 〈Fig. 12〉는 기둥 중단부 휨파괴 (왼쪽)과 하단부 전단파괴 (오른쪽)의 시뮬레이션 결과들을 보여준다.



〈Fig. 12〉 Simulations of a RC column subjected to blast loading and axial pressure

6. 결 언

보호 구조물들의 안전설계를 위한 폭발 하중들은 일반적으로 UFC 3-340-02와 같은 미국 정부 문서들에서 제시된 경험적인 차트를 사용하여 계산되며 이 차트는 미국, 영국 및 유럽의 여러 나라에서 사용된다. 이 차트들은 단순형태의 구조물에 대한 폭발하중의 계산은 가능하지만 복잡한 형태의 구조물이나 환경에는 사용되지 못한다. 대신에 이러한 경우의 폭발하중 계산은 CFD 해석을 통하여 종종 이루어진다.

UFC 3-340-02에 제시된 차트들은 측정되거나 혹은 추측된 데이터들이다. 이 차트들에서 작은 축적거리의 데이터들은 대부분 실험적으로 검증되지

못하였다. 이는 폭발 근처의 압력과 온도가 너무 높아 현재의 상업적으로 이용 가능한 압력 변환기들은 직접적인 측정이 불가능하기 때문이다. 따라서 파이어볼 내부의 초과압력과 충격량을 확인하는데 검증된 CFD 코드가 매우 유용하게 사용된다.

앞서 제시된 폭발 해석들은 검증 (verified)되고 확인 (validated)된 CFD 코드를 사용하여 수행되었다. 입사 및 반사 초과압력과 충격량, 그리고 충격파의 도달시간의 폭발 변수들에 대한 수치해석결과를 바탕으로 새로운 차트들이 제안되었다. 이 차트들은 UFC 3-340-02에서 제시된 차트보다 작은 축적거리에서 폭발 변수들에 대한 더 정확한 예측을 가능하게 한다. 덧붙여, 작은 축적거리에서의 초과압력 이력은 팽창하는 폭발물의 영향으로 인하여 이상곡선형태의 Friedlander curve로는 표현할 수 없다.

근접거리에서의 폭발압력을 받는 콘크리트 구조물의 해석의 경우 구조 재료의 변형속도, 파괴에너지, 변형률 연화효과 등이 재료모델에 적절히 고려되어야 한다. 컴퓨터 코드들의 데미지 알고리즘은 콘크리트의 재료파괴를 구현하는데 매우 유용하다. Erosion strain의 사용에 있어서 하중속도, 최대하중, 콘크리트의 강도, 메쉬크기 등이 고려되어야 한다.

References

1. ACI. 2011. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
2. ASCE. 2011. Blast Protection of Buildings (ASCE/Structural Engineering Institute (SEI) 59-11). American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
3. CEB. 1993. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Comité euro-international du béton, T. Telford, London.
4. DoD. 2008. Unified Facilities Criteria (UFC): Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02). Departments of Defense, Washington, DC.
5. Dusenberry, D. O. 2010. ed. Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings. Wiley, Hoboken, NJ.
6. Hao, H. and Zhou, X. Q. 2007. Concrete material model for high rate dynamic analysis. Proceedings, 7th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures. Beijing, China, p. 753-768.
7. Johnson, G. R. and Cook, W. H. 1983. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings, 7th International Symposium on Ballistics. International Ballistics Committee, The Hague, Netherlands, p. 541-547.
8. Malvar, L. J. and Ross, C. A. 1998. Review of strain rate effects for concrete in tension. Aci Materials Journal 95 (6): 735-739.
9. Needham, C. E. 2010. Blast Waves. Springer, New York.