공기 중 폭발하중에 대한 창호시스템의 방폭설계 절차에 관한 고찰

A Review on the Blast Resistant Design for Glazing and Window Systems Subject to High-explosive Loadings

허영철†·정태영*·오성근**

Young-Cheol Huh, Tae-Young Chung and Sung-Keun Oh

(2010년 11월 30일 접수 ; 2010년 12월 9일 심사완료)

Key Words : Glazing and Window System(창호시스템), Explosive Loadings(폭발하중), Blast Resistant Design(방폭설계)

ABSTRACT

Anti-terrorism design for public buildings as well as military facilities is important to minimize the mass casualties from terrorist attacks. Also, well designed glazing and window systems can reduce the potential injury of human caused by scattering fragment of a glazing. In this paper, blast resistant design for glazing and window systems is investigated based on the U.S. Standard. The design procedures include minimum requirements for the design, standard practice for design evaluation of the glazing and standard test method for evaluation of the performance.

1. 서론

폭발물, 차량폭탄, 생화학무기 등 테러에 의한 위험도가 높은 미국, 이스라엘에서는 오래 전부터 군 시설물은 물론 주요 관공서, 공공건물 등에 대하여 테러에 대비한 설계표준을 제정하고 건물의 설계에 반영해 오고 있다. 특히 지난 2001년 미국의 세계 무역센터에서 발생한 9·11 테러 이후 미 국방부 소속의 모든 신축 건물에 테러예방 설계표준의 적용을 강화하고 있으며 기존 건물이나 임대 건물에도 최소한의 설계 요구조건이 적용되고 있다. 이러한 건물설계에서 방폭 창호시스템의 시공은 필수적인데 일반 창호의 경우 외부 폭발에 의한 강한 충

격에 매우 취약해서 손상된 유리파편의 비산으로 건물 내부의 인명이 심각한 상해를 입을 수 있기 때문이다.

그 동안 폭발물 테러에 의한 피해사례가 전무했던 국내의 경우 테러예방 설계에 관한 관심도 적었고 방폭 창호시스템의 국내 수요도 거의 없어서 제품개발의 필요성은 물론 관련 연구의 수행 실적도 미미한 형편이었다. 그나마 국내에 주둔하고 있는 미군 기지에서 소량의 대체 수요가 있었으나 미국이나 이스라엘에서 전량 수입한 후 단순 시공만 해왔던 실정이다. 그러나 지난 4월 국토해양부에서 발표한 “건축물 테러예방 설계가이드 라인”에 관한 정책에 따라 종합병원, 초고층 빌딩 등을 포함한 20,000 m² 초과 건축물에 대해 향후 폭발피해 최소화 설계, 피난 및 피해 대비 설비의 계획 등이 점진적으로 적용될 것으로 예상된다. 이보다 앞서 2015년까지 추진 예정인 용산 미군기지 이전사업에서는 모든 건물에 대하여 미 국방부의 테러예방 설계표준이 적용되어 방폭 창호시스템의 수요가 약 3,000억 규모로 추정된다.

† 교신저자; 정회원 한국기계연구원 시스템디자인믹스연구실
E-mail : ychuh@kimm.re.kr

Tel : (042)868-7468, Fax : (042)868-7418

* 정회원, 한국기계연구원 시스템디자인믹스 연구실

** 비회원, (주)동양정공

이 논문의 일부는 2010년 추계 소음진동 학술대회에서 발표되어 우수논문으로 추천되었음.

이러한 배경 하에 (주)동양정공을 포함한 일부 국내 기업에서 방폭 창호시스템의 국내 개발을 서두르고 있으나 개발 제품의 설계검증을 위한 국내 인프라 즉, 성능해석 및 시험과 관련한 기반이 취약하여 대부분 미국의 전문기관에 의존하고 있는 실정이다. 특히 미군기지 이전에 필요한 총 사업비 11조 중에서 한국정부가 부담할 사업비가 약 5조 규모라는 측면에서 소요 전자재의 국산화 개발은 시급하다.

최근 국토해양부와 건설교통기술평가원의 V-10 사업의 일환으로서 초고층복합빌딩 사업단이 발족하였으며 1핵심 과제의 3세부 과제인 “구조시스템 성능 개선기술 개발”에서는 폭발물테러 예방 및 피해경감 설계기술을 포함하여 연쇄붕괴방지, 화재·충돌·가스폭발에 대비한 초고층건물의 구조적인 안전성과 사용성 증대를 목표로 관련 연구가 추진되고 있다⁽¹⁾. 한편, 이경구⁽²⁾ 등은 LS-DYNA⁽³⁾를 활용한 유한요소해석기법을 사용하여 폭발하중에 의한 기둥부재의 거동과 손상 특성에 대한 연구를 수행하였다. 심창수⁽⁴⁾ 등은 알루미늄 폼의 방호구조물에 대해 근거리 폭발에 의한 수치해석을 수행하고 희생 부재의 설계변수에 따른 거동을 평가하였다. 이렇듯 폭발하중을 고려한 구조물 설계분야의 국내 연구는 시작 단계에 있다고 볼 수 있다^(5,6). 이

에 비해 테러위험 국가인 미국의 경우 활발한 연구 활동과 함께 설계표준의 제정 등을 통해 테러예방을 위한 시설물은 물론 방폭 창호시스템의 설계에 연구결과를 적극 활용하고 있다⁽⁷⁻⁹⁾.

이 논문에서는 방폭 창호시스템의 설계부터 성능 시험인증을 획득하기까지 고려해야할 절차와 관련 표준서의 적용에 관해 전반적인 사항을 기술한다. 아울러 미 국방부에서 인증하는 성능시험 기관이 전무한 국내 현실에 비추어 그 중요성이 더욱 크다고 판단되는 성능해석의 절차 및 접근방법에 대해서 미국 내 전문기관의 현황을 중심으로 기술한다. 아직은 기초 단계인 방폭설계 분야에 대한 국내 연구원들의 관심을 확산하고 향후 방폭 시설물의 잠재적 수요에 대비한 기초 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

2. 본 론

2.1 방폭설계 관련한 미국의 표준

시설물 설계 통합규정인 Unified Facilities Criteria⁽¹⁰⁾ (UFC 4-010-01)를 비롯하여 ASTM F 2248⁽¹¹⁾, ASTM E 1300⁽¹²⁾ 그리고 ASTM F 1642⁽¹³⁾ 등이 있으며 각각의 표준들은 상호 보완적이다.

Table 1 Standoff distance and explosive weight for new and existing buildings

Location	Building category	Standoff distance requirements			
		Protection	Standoff distance	Minimum standoff distance	Applicable explosive weight
Controlled perimeter or parking and roadways without a controlled parameter	Billeting and high occupancy family housing	Low	45 m (148 ft.)	25 m (82 ft.)	I
	Primary gathering building	Low	45 m (148 ft.)	25 m (82 ft.)	I
	Inhabited building	Very low	25 m (82 ft.)	10 m (33 ft.)	I
Parking and roadways within a controlled perimeter	Billeting and high occupancy family housing	Low	25 m (82 ft.)	10 m (33 ft.)	II
	Primary gathering building	Low	25 m (82 ft.)	10 m (33 ft.)	II
	Inhabited building	Very low	10 m (33 ft.)	10 m (33 ft.)	II
Trash container	Billeting and high occupancy family housing	Low	25 m (82 ft.)	10 m (33 ft.)	II
	Primary gathering building	Low	25 m (82 ft.)	10 m (33 ft.)	II
	Inhabited building	Very low	10 m (33 ft.)	10 m (33 ft.)	II

UFC 4-010-01은 시설물에 대한 대테러 예방 설계표준으로서 기본적으로 건물의 용도 별로 방어수준(level of protection)을 정의하고 테러 위협물(폭발물, 화염무기, 화재, 생화학무기 등)의 중량, 이격거리(standoff distance) 등의 폭발조건을 정의한다.

UFC 4-010-01에서 정의하는 폭발조건을 Table 1에 보였다. 이러한 폭발조건은 건물이 통제구역 내에 위치하는지의 여부, 폭발물의 운반수단(사람, 차량, 배, 소포 등) 그리고 건물 주변으로의 접근가능 경로(주차장, 일반 통행로, 철길, 쓰레기통 등) 등에 따라 달라진다. 통제구역 내 주요 건물의 폭발 이격거리를 Fig. 1에 보였다. 그 밖에 건물의 구조설계, 창호 및 배치설계 그리고 건물 내 기장·의장·전장설계 등에 필요한 최소 요구조건들을 규정한다. 창호시스템의 경우 잠재적 손상의 형태를 그 정도에 따라 분류하여 방어수준을 정하고 이를 달성하기 위한 최소한의 유리 두께와 이를 지지하는 창틀구조의 강확보를 위한 설계 요구조건 등을 정의한다.

Fig. 1 Standoff distances - controlled perimeter

Fig. 2 Graphical relationship between standoff distance, TNT charge mass, and 3-sec. design load

ASTM F 2248은 폭발조건 즉, 폭발물 중량과 이격 거리가 결정되면 이에 대응하는 등가의 설계하중을 압력의 크기로 산정할 수 있는 도표를 제공한다. 다만, 산정된 설계하중은 사각형의 편평한 접합 유리(laminated glass)에 대해서만 유효하다. 폭발조건에 대한 설계하중의 산정 도표를 Fig. 2에 보였다.

ASTM E 1300은 압력의 크기로 산정된 설계하중에 대해 설계된 유리의 하중 저항력(load resistance)이 적절한지를 평가하는 표준절차서다. 유리의 종류와 주요 치수, 두께 등의 설계변수에 대해 하중 저항력을 산출할 수 있는 도표가 제공되며 유리의 하중 저항력이 설계하중보다 큰 값이면 주어진 하중조건에서 유리의 파손확률이 1000장 중의 8장 이하로 판단하고 적절히 설계된 것으로 평가한다. Fig. 3은 주요 치수가 1200 mm×1500 mm×6 mm인 일반유리에서 보정을 고려하지 않은 하중 저항력이 2.5 kPa로 산출된 예다.

ASTM F 1642는 주어진 설계하중에 대해 창호 시험품의 위험등급(hazard rating)을 평가하기 위한 시험 표준이다. 폭발하중을 모사하는 방법에 따라 압축공기를 이용하는 shock tude test와 실제 TNT를 폭발시키는 open-air arena test로 구분된다. 시험품 1중에 대해 동일한 조건으로 3번의 시험을 수행한 후 유리의 파손 정도, 파편의 크기 및 비산거리 등을 조사하여 정해진 위험등급에 따라 시험결과를 평가한다.

2.2 방폭 창호시스템의 설계

방폭 창호시스템이란 건물 외부로부터의 강한 폭발압력에 견딜 수 있도록 잘 설계된 다중의 접합

Fig. 3 Non-factored load chart for 6.0 mm glass

유리와 창틀구조 및 잠금장치(hardware)로 구성되는데, 창틀구조는 접합유리를 적절한 강성으로 지지하면서 폭발에 의한 순간적인 충격에너지를 효율적으로 흡수할 수 있도록 강철 또는 알루미늄으로 설계한다. 한편, 창틀구조를 건물에 고정시키는 앵커시스템까지 포함하여 방폭 창호시스템이라 칭한다.

방폭 창호시스템 개발을 위한 흐름도는 Fig. 4와 같다. 기지이전 사업의 수요처인 미 공병대에서 요구하는 폭발조건이 결정되면 이를 만족하기 위한 설계가 진행되며 단계 별로 유리 및 창틀구조에 대해 설계표준에 근거한 검토가 수행된다. 최종 설계도면을 바탕으로 상세해석에 의한 검토가 완료되면 시제품이 제작된다. 제작된 시제품이 창호의 기본성능인 단열, 기밀/수밀 및 구조성능을 확인하는 시험을 만족하면 최종적으로 폭발하중에 대한 방폭성능 시험을 실시한다. 이러한 제품개발 과정 중에 시험에 실패하거나 사양이 변경되는 경우 종종 재설계가 요구된다. 따라서 기본성능 및 방폭성능 시험에 대한 최종 인증을 획득하기 전까지 수많은 반복설계와 수치해석에 의한 성능검토가 필요하다.

접합유리의 종류, 두께의 설계는 기본적으로 UFC의 standard 10에서 요구하는 규정에 따라 최소한의 조건이 충족될 수 있는 설계가 가능하며, 접합

유리의 사이에 삽입되는 PolyVinylButyral(PVB) film과 공기층의 두께를 결정하는 기본 사항들은 어느 정도 알려져 있다. 창틀구조는 접합유리의 네 변이 창틀구조의 내부로 삽입되는 깊이(bite), 실리콘을 이용한 창틀과 접합유리의 결합상태 등을 고려하여 적절한 강성을 갖도록 설계하는데 이 표준에서는 창틀의 강성이 통상 접합유리의 2배 수준을 초과하도록 권장하고 있다.

2.3 방폭 창호시스템의 성능해석

(1) 설계표준에 근거한 정적 해석

UFC 표준에 정의된 폭발조건 즉, 폭발물의 중량 및 이격 거리가 정해지면 ASTM F 2248 표준에 따라 등가의 설계하중을 산정한다. 기본 설계가 완료된 후에는 유리의 종류 및 그 조합, 두께 등을 활용하여 ASTM E 1300 표준절차에 따른 하중 저항력을 산출한다. 산출한 하중 저항력이 설계하중보다 크면 적절히 설계된 것으로 판단한다. 이때 접합유리의 하중 저항력은 일반유리, 반강화 유리 그리고 강화유리 등 종류별로 분류한 적절한 보정 값(glass type factor)이 고려되고 다중 접합유리의 경우 각각의 두께의 세제곱 승에 반비례하는 하중분산 효과(load share factor)도 함께 고려한다. 다중 접합유리의 하중분산 효과는 다음과 같이 결정된다.

$$LS_1 = \frac{(t_1^3 + t_2^3)}{t_1^3}, LS_2 = \frac{(t_1^3 + t_2^3)}{t_2^3} \quad (1)$$

여기서, t_1 은 첫 번째 접합유리의 두께, t_2 는 두 번째 접합유리의 두께다. LS_1 은 첫 번째 접합유리의 하중분산 효과, LS_2 는 두 번째 접합유리의 하중분산 효과를 의미한다.

한편, 중앙부의 최대 처짐은 다음과 같은 다항식⁽¹⁴⁾으로 근사 추정할 수 있다.

$$w = t \cdot \exp(r_0 + r_1x + r_2x^2) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r_0 &= 0.553 - 3.83(a/b) \\ &\quad + 1.11(a/b)^2 - 0.0969(a/b)^3 \\ r_1 &= -2.29 + 5.83(a/b) \\ &\quad - 2.17(a/b)^2 + 0.2067(a/b)^3 \\ r_2 &= 1.49 - 1.91(a/b) \\ &\quad + 0.82(a/b)^2 - 0.0822(a/b)^3 \end{aligned}$$

Fig. 4 Design and manufacturing flow of glazing and window systems

$$x = \ln \{ \ln [q(ab)^2 / E t^4] \}$$

여기서, q 는 설계하중, a 는 유리의 긴 변의 길이, b 는 유리의 짧은 변의 길이, t 는 유리의 두께 그리고 E 는 유리의 탄성계수다. ASTM E 1300 절차서는 기본적으로 단순 평판 이론에 기초하기 때문에 유리의 네 변은 단순지지 조건이며, 하중은 유리표면에 균일하게 분포한다고 가정한다.

창틀은 앞서 산정한 설계하중에 대한 구조 강도의 적정성을 검토하여 허용치 설계를 수행한다. 직사각형의 구조인 경우 통상 가장 긴 변에 대해서만 검토한다. 단순 보 이론에 기초하여 최대 굽힘 응력 및 처짐을 계산한 후 허용치를 만족하는지의 여부를 판단한다. 보수적인 설계로써 항복응력을 허용응력으로 정하는 탄성설계가 일반적이며 최대 처짐은 가장 긴 변의 길이의 1/160 미만을 만족해야 한다.

(2) 수치해석 기법에 근거한 동적 해석

UFC 4-010-01에서 정의된 폭발 조건에 대응하는 동하중은 UFC 4-010-10에서 규정한다. 유감스럽게도 UFC 4-010-10는 배포가 금지된 표준으로서 상세 내용을 파악할 수는 없다. 동하중은 폭발 조건에

Fig. 5 Typical time history of initial shock wave caused by high-explosive loading

Fig. 6 Performance conditions for window system response against air-blast loadings

따라 최대압력, 지속시간 및 충격량으로 정의되며 수치해석에 의한 동적 해석의 기초자료로 활용되기도 한다.

폭발물에 의한 초기 충격파의 전형적인 형태를 Fig. 5에 보였다. 압력이 양의 부호일 때 정압(positive pressure)이라 하고 음의 부호일 때 부압(negative pressure)이라 하며 부압은 대상 구조물에서의 반사 또는 회절효과로 인하여 발생한다.

초기 충격파의 핵심 파라미터를 예측하는 방법은 크게 경험식에 의한 방법과 전산유체역학 기법을 이용한 정밀해석 방법으로 구분할 수 있다. 경험식에 의한 방법은 Kingery⁽¹⁵⁾ 등이 제안한 식을 기초로 프로그램화 된 ConWep이 많이 활용되고 있으며 정밀해석 방법은 폭발물의 상태식에 기초하여 폭발물을 모델링하고 충격파의 전달 매개체인 공간 영역에서는 유한요소모델을 이용한다.

접합유리만의 성능해석은 미 정부기관인 GSA (general service administration)에서 배포권한을 갖고 있는 WINGARD 프로그램이 널리 활용되고 있다. 접합유리를 단자유도로 모델링하고 주어진 설계 조건에서의 동하중에 대한 응답을 시간적분법으로 계산한다. 이로부터 유리파편의 비산거리에 따른 위험등급을 평가하거나 압력-충격량 성능곡선을 평가하여 접합유리의 설계 적정성 여부를 검토한다. 단순모델링에 의한 해석으로 적용이 쉽고 계산시간이 빠르다는 장점이 있으나 유리와 창틀구조의 연성을 고려할 수 없는 한계가 있으므로 최종 설계단계에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA 등을 활용하여 전체 시스템에 대한 상세해석을 수행한다.

2.4 방폭창호 시스템의 성능시험

(1) Open-air arena test

개방된 공간에 콘크리트 등으로 시공한 밀폐형 간이 시설물에 시험품을 설치하고 이로부터 일정거리 떨어진 위치에서 TNT 폭발물을 점화한다. 폭발물의 중량과 이격 거리는 ASTM F 1642에 따라 시험소에서의 시험이 가능한 수준으로 결정된다. 등가의 폭발 조건은 scaled Z-value를 기준으로 가능한 수준의 폭발조건을 설정한다.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3)$$

Fig. 7 Facility for shock tube test

여기서, R 은 이격 거리(m), W 는 폭발물의 중량(kg)을 의미한다. UFC 4-010-01에서 정의된 폭발조건(R_1, W_1)을 만족해야 하는 시험이라면 $Z = R_1/W_1^{1/3}$ 를 기준으로 등가의 폭발조건(R, W)를 결정한다.

시험품 1종에 대해 3개의 샘플을 준비하여 동일한 조건에서 3회의 폭발시험을 수행한다. 손상된 유리파편의 비산거리에 따라 Fig. 6에 보인 바와 같은 위험등급을 결정한다. 유리파편은 폭, 길이, 두께를 합한 통합 길이로써 2.5 cm 이상 되는 파편만을 합산하여 그 길이가 25 cm를 초과하지 못한다.

(2) Shock tube test

약 30 m 길이의 원통형 관(tube)의 중간 부분에서 수백 psi의 압력으로 공기를 압축시킨 후 순간적으로 방출시키면 이로부터 약 10 m 후방에 설치된 창호의 시험품에 고압의 충격파가 전달된다. 충격파는 정압만이 존재하고 부압은 거의 발생하지 않는 특징이 있다. 이는 충격파가 전달되는 일정구간의 관 단면의 특성 때문이며 시험품에 근접한 구간의 관 단면이 계단식으로 증가하고 그 사이사이의 공간이 개방되도록 설계된다. 시험의 종료 후에는 ASTM F 1642에 따라 손상된 유리파편의 합산 길이를 조사하고 비산거리에 따른 위험등급을 결정한다. Fig. 7은 미국의 전문 시험기관에서 보유하고 있는 시험장비의 모습이다.

3. 결 론

대테러 예방을 위한 방폭 창호시스템의 설계와 관련된 표준, 성능해석 및 성능시험 절차에 대해 미

국의 현황을 중심으로 간략히 살펴보았다. 미 국방부 소속의 모든 신축 건물은 UFC에 의한 설계표준의 적용이 의무사항이며 더불어 방폭 창호시스템의 시공은 필수적이다. 미군기지 이전사업의 창호시스템 입찰에 국내 기업이 참여하기 위해서는 수요처인 미 공병대에서 요구하는 open-air arena test에 의한 성능인증의 획득이 필수조건이다. 이를 달성하기 위해서는 관련 표준 또는 상용 코드를 활용한 성능해석 기법을 확립하는 것이 무엇보다 중요하다. 아울러 장기적인 관점에서 arena test를 수행할 수 있는 국내 시설확보 방안도 함께 검토해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 산업기술연구회가 지원하는 한국기계연구원의 주요사업 중 하나인 “기계기술 네트워크 프로그램”사업의 일환으로 수행하였으며 연구 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Super-Tall Buildings R&BD Center, 2009, “<http://www.supertall.org>”.
- (2) Lee, K. K., Kim, T. J., Kim, E. S. and Kim, J. K., 2007, “Behavior of Steel Columns Subjected to Blast Loads,” Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 23, No. 7, pp. 37~44.
- (3) Whirley, R. G. and Engelmann, B. E., 1993, “DYNA3D: A Nonlinear Explicit Three-dimensional Finite Element Code for Solid and Structural Mechanics,” User Manual, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- (4) Shim, C. S. and Yun, N. R., 2010, “Evaluation of Close-range Blast Pressure Mitigation Using a Sacrificial Member,” Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 14, No. 1, pp. 11~23.
- (5) Huh, Y. C., Chung, T. Y., Moon, S. J. and Oh, S. K., 2010, “A Review on the Process of Blast Effect Analysis for Designs of a Glazing System Against Explosive Loadings,” Proceedings of the

KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 136~137.

(6) Bin, J. H., 2009, "Numerical Study of Sound Generation Mechanism by a Blast Wave," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 10, pp. 1053~1061.

(7) Bogosian, D. and Fu, S., 2004, "Infiltration of Airblast into Buildings through Glazed Openings," 31st Explosives Safety Seminar, San Antonio, Texas.

(8) Crawford, J. E. and Magallanes, J. M., 2006, "Evaluation of the State of the Art Pertaining to Structural Steel Applications in Blast-resistant Design," Karagozian & Case, Burbank, CA, TR-06-9.1.

(9) Timmel, M., Kolling, S., Osterrieder, P. and Dubois, P. A., 2007, "A Finite Element Model for Impact Simulation with Laminated Glass," Int. J. of Impact Engineering, Vol. 34, pp. 1465~1478.

(10) UFC 4-010-01, 2007, "DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings," Unified Facilities Criteria, Department of Defence, U.S.A.

(11) ASTM F 2248, 2003, "Standard Practice for Specifying an Equivalent 3-Second Duration Design Loading for Blast Resistant Glazing Fabricated with Laminated Glass," American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards.

(12) ASTM E 1300, 2007, "Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings," American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards.

(13) ASTM F 1642, 2004, "Standard Test Method for Glazing Systems Subject to Airblast Loadings," American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards.

(14) Dalglish, A., Structural Design of Glass for Buildings, National Research Council of Canada.

(15) Kingery, C. N. and Bulmash, G., 1984, "Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst," Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD.