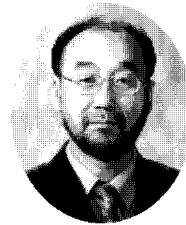


## 케이블 넷 파사드

### Prestressed Cable Net Facades



박 선 우\*  
Park, Sun-Woo

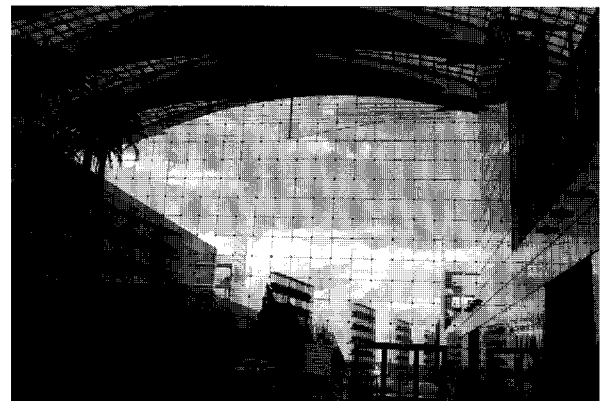


최 취 경\*\*  
Choi, Chui-Kyung

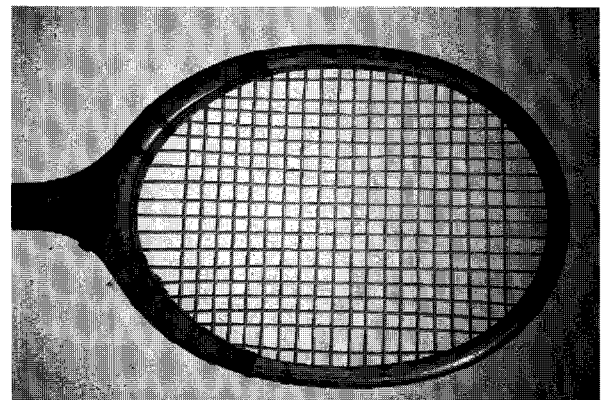
1990년에 슬라히(J. Schlaich)가 최초로 개발하여, 독일 뮌헨 공항의 캠프스키 호텔(Hotel Kempinski)에 사용된 케이블 넷 파사드는 유리 투명성에 대한 미래의 방향을 제시하고 있다. 이러한 혁신적인 유리 건축물은 특허가 해제되면서 세계 각국에 널리 이용되었다<그림 1>.

이러한 구조는 유리를 서로 연결하지 않고 케이블 넷 질점에 설치된 고정철물에 정사각형 또는 직사각형 유리를 점 형태로 고정시킨 평면 단층으로, 소위 케이블 넷 파사드다.

케이블은 수직·수평으로 계획되고 시각적으로 구조물로 인지되지 않고 단지 유리사이의 실리콘 접합으로만 보인다. 유심히 살펴보지 않으면 무엇이 메인 구조인가를 인지할 수 없을 정도로 투명하다. 기본적인 구조형태는 우리가 이용하고 있는 테니스 라켓과 유사한 형태로 표현할 수 있다. 격자로 당기는 힘은 라켓 테두리에 압축력으로 작용하지만, 건축 파사드에서 이용되는 형태는 수직·수평으로 계획된 형태로 생각하면 쉽게 이해할 수 있을 것이다<그림 2>.



<그림 1> 최초로 시도된 케이블 넷 파사드  
(캠프스키 호텔, 독일 1990)



<그림 2> 케이블 넷 파사드의 기본원리인 테니스 라켓

\* 정회원 · 한국예술종합학교 건축과 교수, 공학박사

\*\* 정회원 · 경원대학교 건축공학과 교수, 공학박사

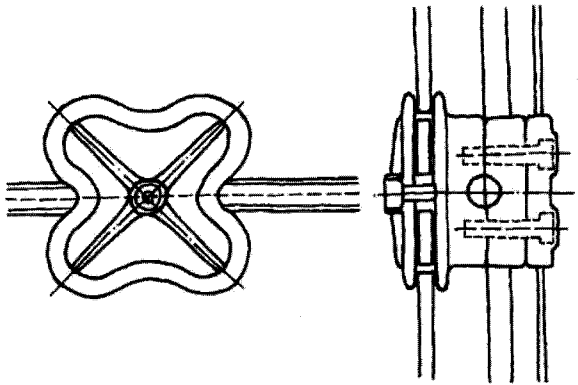
건축가들은 가능한 가볍고 투명한 파사드를 선호하는 경향이 있다. 여기에서 소개되는 파사드 구조는 엔지니어의 발상이 뛰어나다. 엔지니어의 창조적인 능력 없이 이러한 구조는 가히 불가능하다고 할 수 있다.

이러한 유리 구조물이 여러 나라에서 사용되었지만, 아직 한국에서 사용된 적이 없어 기술기사로 이러한 유리구조물을 소개하고자 한다. 최초로 사용된 캄핀스키 호텔 파사드를 중점적으로 소개하고, 그 밖에 사용된 사례를 간략하게 기술하기로 한다.

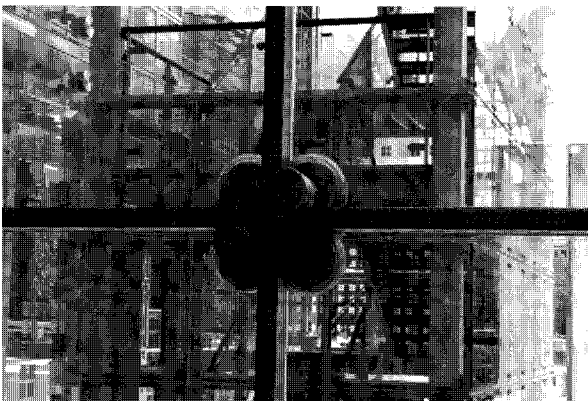
### 1. 캄핀스키 호텔(뮌헨, 1990)의 케이블 넷 파사드

미국 시카고에서 활동하고 있는 독일 뮌헨 출신인 건축가 헬무트 얀(H. Jahn)은 호텔 박공면의 파사드로서 최대한 투명한 “스크린 월(screen wall)”을 생각하고 있었다.

구조물로서 케이블 넷 파사드를 제안되었을 때,



〈그림 3〉 케이블 넷 절점의 디테일 도면

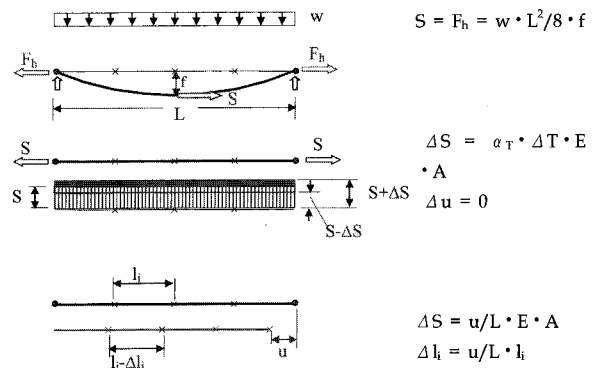


〈그림 4〉 수직·수평 케이블의 조인트 디테일

취성이 약하고 거의 유연성이 없으며 하중을 받을 수 없는 재료인 유리와 거의 제어할 수 없는 케이블의 변형으로서는 거의 불가능하였다. 그러나 실험적인 결과로 상당히 낙관적인 결과를 얻었다. 프리스트레스된 1.5×1.5m의 유리판은 15cm의 비틀림에도 견딘다는 낙관적인 결과로부터 실험적인 모험이 시작되었다<그림 3-4>.

#### 1.1 프리스트레스

풍하중 상태에서 1.5×1.5m 간격의 스텔레스 케이블(φ-22mm)로 계획된 40×25m 크기의 캄핀스키-파사드를 위한 케이블 넷의 휨과 유리판의 물리적 특성은 허용치의 범위에서 적절한 프리스트레스의 선택으로 한정될 수 있다. 양면에 평행하게 배치된 건축물과 강구조 지붕아치 사이에 위치하는 파사드는 프리스트레스 힘을 전달하기 위한 견고한 테두리 라멘으로 계획된다. 수평 케이블은 75kN, 수직 케이블은 25kN로 프리스트레스 된다. 프리스트레스는 특히 앵커부분의 유연성에 상당히 유리하다. 왜냐하면 그것은 파사드의 불리한 변형을 전체 유리 접합부로 균일하게 분배하고, 접합부에 힘의 집중과 유리의 파괴 확률을 줄여 준다<그림 5>.



〈그림 5〉 풍하중, 온도변화, 고정점의 유연성에 있어서 케이블의 구조거동

#### 1.2 변형

유리판이 파사드 면의 내외에서 뒤틀림으로 인한 파손을 방지할 수 있도록, 유리판 뒤틀림에 대한 프리스트레스를 조절해야 할 뿐만 아니라, 유리 고정을 위한 지지 재료가 충분히 유연하도록 계획되어

야 한다. 그것을 위하여 허용치와 예상된 변형에 따라 고정점에서 유리판이 과도한 구속력이 발생하지 않도록 하여야 한다. 풍하중 상태에서 케이블 앵커에 발생할 수 있는 회전각은 특수한 고정 디테일로 케이블을 조절할 수 있으며, 후에 케이블 앵커의 조절이 가능하다. 또한 건물의 변형으로 인한 프리스트레스의 이완은 후에 조절이 가능하다. 캠프스키 파사드의 바닥면에서, 고정된 출입구의 라멘 모서리에 있는 유리판에 과도한 응력을 유발할 수 있다. 그리하여 케이블에 걸리는 힘을 해결하기 위하여 케이블 넷트와 함께 변형되고 바닥에 견고하게 고정된 출입구 라멘은 어느 정도 이동이 허용되는 라멘으로 계획되어야 한다.

### 1.3 천공이 없는 유리고정

1986년에 파리 라 빌레트(La Vilette)의 유리 파사드를 위해 페터 라이스(P. Rice)가 개발하여 적용된 유리를 천공한 점지지 형태는 그 당시에 점지지 형태의 표준이었다.

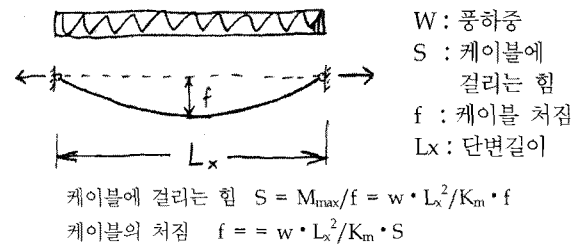
정확히 하중을 전달시켜야하고, 경제적으로 고가인 유리 모서리의 천공 지점은 상당한 취약점을 가지고 있다. 프리스트레스된 파사드에서 구속력으로 인한 유리판의 뒤틀림으로 추가적인 하중을 부담하는 모서리는 유리천공 없이 유리판이 자유롭게 움직일 수 있는 새로운 유리고정에 관한 개발이 필요하였다.

케이블 넷트 파사드 이외에 캠프스키 호텔 로비에는 6×7m의 하중을 받는 유리 서랍장과 스패인 2.4m인 계단에 유리를 이용한 구조물이 세워졌다. 두개의 유리구조물은 엔지니어에 의해 계획되었고 구조재로서 유리가 사용되었다.

## 2. 케이블 넷트의 구조거동

프리스트레스의 트릭 없이 케이블 넷트 파사드는 불가능하였을 것이다. 여기서 프리스트레싱이 얼마나 효율적이었는가는 단순한 프리스트레스된 케이블을 사례로 다음과 같이 살펴보기로 하자.

케이블은 단순히 늘어뜨릴 경우에 풍하중과 같은 수직하중만 받을 수 있다. 거기에서 케이블 힘 S는



케이블의 프리스트레싱

모멘트 계수	$K_m$	13	10.3	9.0	8.3	8.0
장단변비	$L_y:L_x$	1.0	1.25	1.5	1.75	$\geq 2$

<그림 6> 풍하중 상태에서 케이블에 걸리는 약식계산 (케이블의 프리스트레싱은 S의 약 50-60%가 적절)

처짐 f과 반비례한다. 하중을 받는 상태에서 케이블의 프리스트레싱으로 처짐 f는 직접적으로 조절이 가능하다. 즉, 프리스트레싱이 커질수록 케이블의 변형은 적어진다.

합성강화유리는 파사드 면에 수직적으로 약  $L_x/50$ 까지 아무런 파괴 없이 에어쿠션 모양으로 변형된다. 파사드 면에 발생하는 변형은 케이블의 프리스트레싱으로 모든 유리면에 균등하게 분배된다.

온도변화는 유리의 고정점의 위치변화가 아니라, 길이와 상관없이 케이블에 가해지는 프리스트레싱의 변화를 유발시킨다. 그로 인하여 상당히 긴 파사드는 과도한 신축이음 없이 건축이 가능한데, 이것은 계산상 표현할 수 없는 하나의 장점이다.

지지부분의 유동성에 의한 변이는 전체 케이블의 길이에 걸쳐 균등하게 분배되고 테두리에 신축이음이 필요 없다. 테두리 변이에 수직인 건축물 이음에서 자연스러운 이동이 가능하도록 해야 한다.

여기에서 긴 케이블이 짧은 케이블보다 유리하다. 케이블 넷트 파사드에 걸리는 힘과 변형은 단순히 개략적으로 계산이 가능하다<그림 6>.

최대 변형은 당연히 해석적이고 실험적으로 증명되어야 하지만, 약  $L_x/50$ 이 한계치인 듯 싶다. 네오플랜 층의 탄성은 개개의 경우에 따라 조절되어야 한다. 시간적인 영향과 같은 재료계수에서 불확실성은 E-모듈에 대한 한계치를 통하여 고려되어야 한다.

### 2.1.1 축으로 당겨진 특수한 케이블 넷트 파사드 장단변 비율이 $L_y/L_x \geq 2$ 인 경우부터 케이블 넷트

파사드는 하중은 1방향으로 전달되고, 케이블에 걸리는 힘이 2방향으로 전달되는 파사드(Ly/Lx=1)에 비하여 동일한 변형인 경우에 약 60% 정도 증가한다.

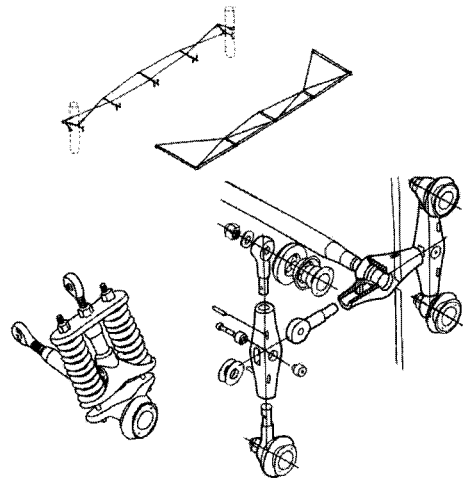
건물 모서리에서 유리의 뒤틀림을 해결하기 위하여, 길고 1방향 파사드임에도 불구하고 변형을 견고한 테두리에 균일하게 분배할 수 있는 프리스트레스된 수평 케이블을 설치하는 것 바람직하다. 그렇지 못한 경우 큰 파사드 변형(약 L/50)은 견고한 벽체에서 가능하도록 계획되어야 한다.

1방향 파사드는 1방향 슬래브가 단지 2방향 슬래브의 특별한 경우로 생각할 수 있는 것과 같이 거의 탈재료화 된 유리 건축물의 확실한 이정표가 될 수 있다.

## 2.2 탄성 용수철

1986년에 라이스(P. Rice)는 파리의 라 빌레트의 케이블 거더 파사드에서 파사드면에 스파이더와 함께 연결된 유리판이 견고한 정사각형 테두리 부재에 고정되기 때문에 유리 커튼을 매달기 위해 자체적으로 응력조절이 가능한 탄성 용수철을 사용하였다<그림 7>.

충분한 케이블 길이의 경우에 케이블 넷트 파사드에 사용되는 탄성 용수철은 프리스트레스 된 케이블 자체가 파사드면에서 발생하는 변이를 각 유리접합부에 균등하게 분배시키는 최상의 용수철이기 때문에 단지 하이-텍(high-tec)의 장식물에 불과하다. 탄성 용수철의 사용으로 풍하중의 경우 케이



<그림 7> 라 빌레트에 사용된 유리 파사드 디테일과 탄성 용수철

블에 약 40% 정도의 추가 응력이 발생된다. 큰 변형에서는 사용이 의문시 되며, 파사드 면에서 변이는 탄성 용수철이 달린 접합부에 집중된다.

케이블은 가능한 신축하려 할 것이고, 단지 불충분한 길이와 지지부분의 비정상적인 유연성의 경우에 탄성용수철을 사용하게 될 것이다.

## 3. 건축 사례들

위에서 살펴 본바와 같이 캄핀스키 호텔에서 케이블 넷트 파사드가 최초로 사용되어 기술적인 면은 검증되었다. 이러한 파사드는 점진적으로 세계 각국에 전파되기 시작하였다. 여기에서 각각의 구조물에 대한 규모나 구조적인 특성을 알아보기로 하자<표 1>.

<표 1> 케이블 넷트에 관한 사례조사

건축사례	파사드규모 (m)	케이블 수평/수직 (Ø-mm)	유리크기 (m)	유리 (mm)	파사드 입면
Kampinski Hotel, Munich, 1990	40×25	22/22	1.5×1.5	10	상부아치
WTC, Dresden, 1995	24×26	20/20	1.35~1.56×1.7~2.07	2×6	상부아치
Holzhafen, Hamburg, 2000	15×13,15×10, 15×08	18/10	1.35×1.10	2×8	장방형
Römische Badruine, Badenweiler, 2001	34×08	16/16	1.27~0.96×1.87	2×8	상부아치
Time Warner Center, New York, 2003	26×45(입구홀)	28/28	2.14×1.22		장방형
	26×16(재즈홀)	22/22	2.14×2.44		
Jakob-Burckhardt-Haus, Basel	15×18	18/22		2×8	장방형
Auswärtiges Amt, Berlin, 1999	32.4×24	26/26	2.7×1.8	2×10	장방형
UBS Tower Chicago, 2001	10×13,10×14	22/22	1.53×1.53		장방형

### 3.1 WTC, 드레스덴, 독일(1995)

여기에서 파사드 거더는 기초에 추가적인 하중 없이 전체적인 프리스트레스 힘을 패쇄시키는 양면의 건축물과 함께 견고한 라멘으로 구성된다. 전체적인 파사드는 운동이 가능한 라멘으로 계획되었다. 라멘은 상부로 된 아치와 양측에 설치된 구조물로 구성된다<그림 8>.

### 3.2 홀쯔하펜, 함브르크, 독일(2000)

3개의 중정은 케이블 넷트 파사드에 의해 둘러 쌓여 있다. 2 파사드의 경우, 둘러싸여 있는 현존 건축물은 상부에 비렌들 트러스가 설치되어 있고, 다른 하나의 파사드 경우에 상부 테두리에 설치된 현수 케이블이 수직 넷트 케이블에 걸리는 힘을 부담하고 있다<그림 9>.

### 3.3 로마 온천유적지, 바덴바일러, 독일(2001)

로마유적지를 외부기후로부터 보호하고 최상의 투명성을 확보하기 위하여, 케이블 넷트 파사드에서 유리사이의 실리콘 마감을 생략하는 케이블 넷트

파사드로 계획되었다<그림 10>.

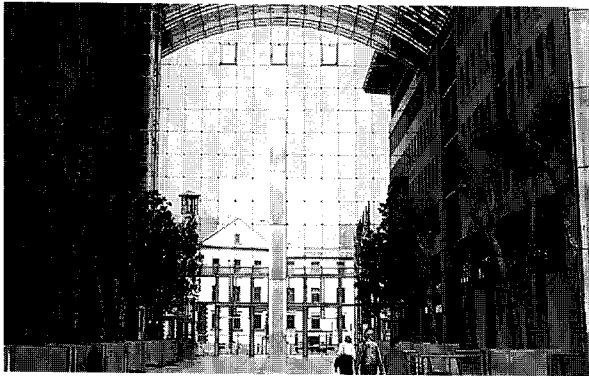
### 3.4 타임 워너 센타, 뉴욕, USA(2003)

센츄럴 파크의 남서쪽과 브로드웨이가 만나는 지점인 콜롬부스 서클(Columbus Circle)에 출입구가 26×45m의 대형 케이블 넷트 파사드로 된 250m 높이의 트윈 타워(Twin Tower)가 있다.

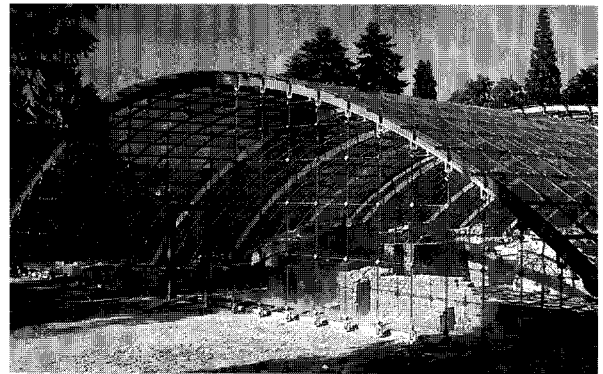
로비 내부에 있는 “재즈 홀(Jazz Hall)” 은 약 4도 경사지고 16×26m 크기의 유리벽(소위 재즈 월)로 음향적인 목적으로 설치되었다. 2개의 투명한 유리벽은 입구홀로부터 시작되고, 특히 재즈 홀에서부터 보이는 센츄럴 파크의 환상적인 전경과 뉴욕의 실루에트는 투명한 케이블 넷트 파사드의 가치를 더해 준다<그림 11>.

수직으로 걸리는 케이블 힘은 내부 유리벽의 방향으로 경사진 철골 트러스 거더에서 부담하는데, 외부에서는 인지할 수 없다.

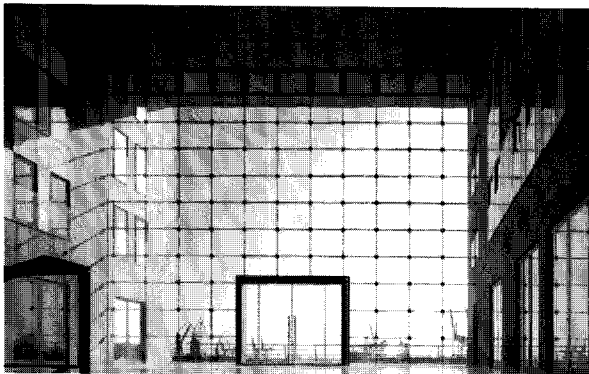
내부 유리벽의 2.14×2.44m 크기의 소음방지 유리들은 온도나 그 밖에 다른 영향으로 유리벽의 처짐을 방지하기 위해 바닥에 탄성 용수철이 설치된 수



<그림 8> WTC, 드레스덴, 1995



<그림 10> 로마 온천유적지, 바덴바일러, 2001



<그림 9> 홀쯔하펜, 함브르크, 2000



<그림 11> 타임 워너 센타, 뉴욕, 2003

직으로 경사진 케이블에 의해 지지된다. 이것은 케이블에 거의 동일한 프리스트레스를 유지시키고 약 내부로 4도 경사진 유리벽의 자중으로부터 처짐을 균등하게 유지시킨다.

### 3.5 야콥 부쿠하르트 하우스, 바젤, 스위스

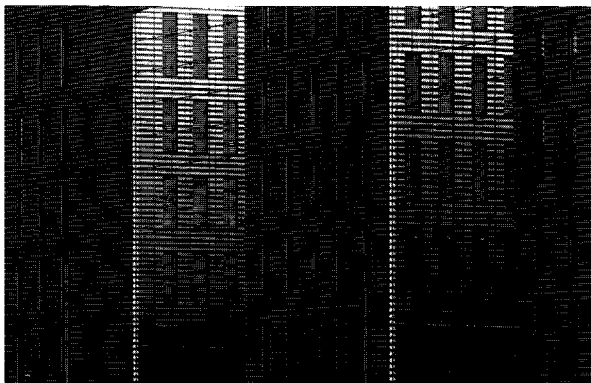
이 오피스 빌딩은 전체적으로 12개의 중정을 가지고 있는데, 외부로부터 교통소음을 막기 위해 케이블 넷트 파사드를 이용하였다. 완벽한 투명성을 가지고 강렬한 외부 소음을 막을 수 있다는 것에 상당히 인상적이다<그림 12>.

### 3.6 외무부, 베를린, 독일(1999)

이러한 예술과 구조의 협업은 미국 유리예술가 카펜터(J. Carpenter)와 베를린 건축가인 라이만(M. Reimann)에 의해 이루어 졌다. 수평 케이블과 수직 케이블은 45cm의 간격을 두고 고정되었다. 전면에 위치하는 수직 케이블에 유리판이 고정되고 후면에 위치하는 수평 케이블에는 2색상의 유리띠가 설치되었다. 태양빛이 비치면 내부로 굴절되어 오는 움직이는 빛은 환상적인 장면을 연출한다. 실내에서 보이는 글래스 윌의 푸르스름한 유리띠는 여기서 유리가 반사되는 특성을 이용하여 외형을 결정하며, 최소한의 구조물은 외형상 시각적으로 거의 인지할 수 없다<그림 13>.

### 3.7 UBS-타워, 시카고, USA(2001)

200m 높이 UBS 타워의 전체 로비는 고층 빌딩사이



<그림 12> 야콥 부쿠하르트 하우스, 바젤

에 걸쳐 있고, 많은 보행자와 고객을 위한 개방된 분위기를 연출하는 13m 높이의 케이블 넷트 파사드로 지상층에 위치한다. 전체 파사드는 7개로 분할된다. 이것이 미국에 건축된 최초의 케이블 넷트 파사드다<그림 14>.

## 4. 전 망

케이블 넷트 파사드의 발견은 유리 파사드의 최적 투명도에 대한 새로운 이정표로 평가될 수 있다. 이러한 혁신은 유리건축물 분야에서 각인 될 만하며, 세계적으로 널리 확산되었다. 그것은 단지 공간 형성의 한 요소로서 투명하고 경제적인 유리벽을 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 벽 자체가 약간의 진동함으로서 자동차 소음으로 인한 폭음효과에서 에너지를 흡수하는 구조로서 투명한 방음벽으로도 적절하다. 무엇보다도 세계 각국에서 계획되고 건축되고 있는 이러한 혁신적 유리 파사드가 가까운 장래에 한국에서도 세워지기를 기대해 본다.



<그림 13> 외무부, 베를린, 1999



<그림 14> UBS-타워, 시카고, 2001