

초고층건물 계단실 단독 급기가압 제연조건이 연돌효과에 미치는 영향 The Influence of Stairway Pressurization Conditions on the Stack Effect in Super-tall Buildings

박용환 · 김범규*†

Yong-Hwan Park · Beom-Gyu Kim*†

호서대학교 소방방재학과, *호서대학교 대학원 소방학과
(2010. 5. 28. 접수/2010. 8. 16. 채택)

요 약

중앙코어형 80층 초고층건물에서 평상시 동절기 연돌효과에 따른 최대차압은 약 75Pa로 외부 풍속이 없을 시에는 별 문제가 되지 않았으며, 화재로 계단실 단독 급기가압 시에는 급기가압 팬의 위치에 따라 급기 초기에 최대 약 225pa의 차압이 발생할 수 있으며 이를 해소하기 위한 적절한 과압배출장치나 대책이 필요하였다. 급기 송풍기의 위치에 따른 단독하부급기 방식이 최대차압의 크기와 분포 특성 및 최소설계차압 유지를 위한 소요풍량 면에서 가장 유리하였으며, 단독 상부급기방식은 소요급기풍량이나 차압분포 특성을 고려할 때 우리나라 특성에는 가장 적합하지 않는 것으로 나타났다. 차가운 외기 급기로 인해 계단실의 온도가 점차 하강하게 되면 계단실 연돌효과의 감소로 인해 소요풍량이 줄어들었으며 고층부에서의 차압은 줄어드는 반면 저층부에서의 차압이 크게 증가하는 양상으로 변화하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Maximum pressure difference in central core type 80th super_tall buildings was estimated as 75 Pa during no outside wind due to the winter stack effect. Maximum pressure difference of 225 Pa can be obtained depending on the location of air injection fan during the stairway pressurization at fire. Bottom_only air injection system provided the best results in the sense of required air flow rates and pressure distributions. Top_only air supply system was estimated as the worst for this country. It revealed that the decrease of the temperature in the stairway due to the cold outside air injection reduced the required flow rates of the fan and significantly changed the distribution of pressure differences.

Key words : Super-tall building, Stairway pressurization, Stack effect, Air supply fan, Flow rate

1. 서 론

최근 초고층건물의 건립이 급격히 증가함에 따라 특별피난계단실, 엘리베이터 통로 등 수직통로에서 발생하는 연돌효과 저감과 화재 시 피난 안전을 위한 제연 성능 확보가 중요 이슈가 되고 있다. 특히 초고층 연돌효과는 과도한 냉난방 부하와 출입문이나 엘리베이터 문 개폐의 어려움을 발생시킬 뿐 아니라, 화재 시 수직 샤프트를 통해 상부로의 연기확산을 가속화시킴으로써 대규모 인명피해를 야기할 수 있기 때문에 초

고층 방재 대책 수립에 많은 어려움을 야기하고 있다.¹⁾

초고층건물의 계단실은 거주자의 거의 유일한 피난 동선임에도 불구하고 화재발생 시에는 연기의 확산경로가 되어 대규모 인명피해를 야기할 수 있다. 이러한 피해를 예방하기 위한 방안의 하나로 선진국에서 많이 활용하고 있는 계단실 급기가압 방법을 들 수 있으며, 현 국가화재안전 기준에도 이 방식을 적용할 수 있도록 규정하고 있다.

그러나 국내의 경우 그간 계단실 급기가압 제연이 적용된 사례가 거의 전무한 실태이고, 향후 초고층 건물에 적용 시 국내 건축법과의 상관성 등으로 인하여 실질적인 방안 구축이 어려운 실정이다.

† E-mail: kbk0892@hanmail.net

이에 본 연구에서는 CONTAMW 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 통해, 계단실 급기가압 제연이 초고층 건물 연돌효과에 미치는 영향을 정량적으로 예측하고 분석하여, 초고층건물의 연돌효과 저감 방안과 아울러 계단실 급기가압 제연 시의 효과적인 방재대책을 수립하고자 한다.

2. 법적기준

계단실 차압제연과 관련하여 국가화재안전기준 NFSC 501A에서는 계단실 단독 급기가압 시 제연구역과 화재실과 유지하여야 하는 최소차압을 40Pa 이상으로 규정하고 있다.²⁾ 국외의 BS 5588의 경우에는 계단실 단독 급기가압 시 계단실과 옥내와의 차압을 50 ± 5Pa로 규정하고 있으며, 이 경우 누설 틈새를 통해 부속실과 옥내간의 차압은 약 10Pa 정도 유지되는 것으로 되어 있다.³⁾

또한, 최근 개정된 건축법시행령에서는 초고층 건축물의 피난안전을 위한 대피공간으로 피난층 또는 지상으로 통하는 직통계단과 직접 연결되는 피난안전구역을 지상층으로부터 30층 이내마다 설치하도록 규정하고 있다.⁴⁾

3. 시뮬레이션

3.1 분석도구

시뮬레이션을 위한 분석도구는 네트워크 알고리즘을 기본으로 NIST에서 개발되어 연기유동 및 연돌효과에 관한 여러 연구를 통해 그 신뢰성을 인정받고 있는 CONTAMW 프로그램을 사용하였으며, 본 프로그램 활용에 대한 제반 사항은 해당 매뉴얼을 따랐다.⁵⁾

3.2 분석대상 건물의 개요

연돌효과는 공기유동의 수평적 거동보다는 수직적 거동에 더 큰 영향을 받기 때문에 건물의 수평구조에는 덜 영향을 받는다. 따라서 해석의 편의를 위해 대상 건물의 구조는 국내 초고층 주상복합건물의 대표적 구조 중의 하나인 중앙코어방식으로 설정하였으며, 층고는 초고층 효과를 위해 지하 6층, 지상 80층 건물로 가정하였고, 각 층고는 4.2m로 설정하였다. 전형적인 중앙코어방식 구조는 Figure 1에 나타난 바와 같이 건물 중앙부에 상용승강기(EV)와 비상용승강기(EEV), 부속실, 특별피난계단(이하 계단실) 및 EPS실 등이 있으며, 복도(I)를 거쳐 건물 측면으로 거실(A~H)이 둘러싼 형태로 볼 수 있다. 특별피난계단은 국내 건축법에 의

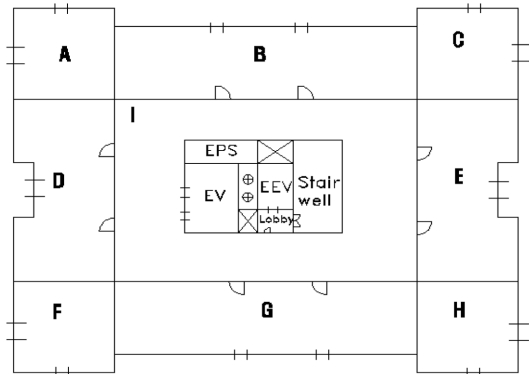


Figure 1. Schematic diagram of the horizontal section of the building.

거 직통계단으로 가정하였다.

3.3 해석 시나리오 및 경계조건

본 연구에서는 초고층건물의 화재 시 피난경로 확보를 위해 제연 방식을 계단실 단독급기가압 방식으로 가정하였다.

출입문 누설틈새는 공기의 수평유동에 영향을 미칠 수 있으므로, 틈새 누설량은 Table 1에 나타난 바와 같이 문의 종류에 해당되는 값을 적용하였다. 외벽의 기밀도는 타 연구에서 제시된 실험결과를 적용하였는데 본 연구에서는 초고층건물의 특성상 외벽의 기밀도가 높은 것으로 가정하여 Table 2의 ‘Tight’ 조건을 적용

Table 1. Leakage Area of the Doors

Type of Doors	Leakage Area (m ²)	Condition
Closed Door	0.9 × 2.1	ΔP = 37.3 Pa, C _D = 0.65
Residential Entrance Door	70 cm ² /item	ΔP = 10 Pa, C _D = 0.6
Stairway Door	120 cm ² /item	ΔP = 10 Pa, C _D = 0.6
Elevator Door	323 cm ² /item	ΔP = 10 Pa, C _D = 0.6
Weatherstripped Door	12 cm ² · ea	ΔP = 4 Pa, C _D = 1

Table 2. Air Leakage Ratio for Exterior Walls

Area Ratio (A/A _w)				Condition
Tight	Average	Loose	Very Loose	Condition
0.5*10 ⁻⁴	0.17*10 ⁻³	0.35*10 ⁻³	0.12*10 ⁻²	ΔP = 75 Pa, C _D = 0.65

Table 3. Temperature Conditions

Location	Temperature
Outdoor	-15°C
Office/Room	24°C
Corridor	22°C
Elevator Shaft	15°C
Vestibule	18°C
Stairway	15°C (w/o air supply)
	+5, -5, -10, -15°C (with outdoor air supply)

하였다.⁹⁾

외기온도는 우리나라에서 연돌효과가 가장 크게 발생하는 동절기 때의 -15°C로 설정하였으며, 해석의 편의상 외부 바람의 영향을 배제하기 위하여 저층에서는 무풍조건으로 하되 고도에 따른 풍속의 영향은 해석에 반영토록 하였다. 또한 거실 초기화재로 인한 복도 실내공기 온도의 변화는 무시하였다.

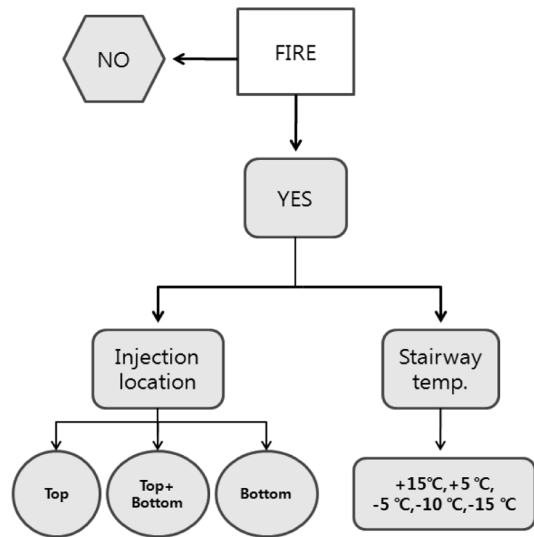
각 층의 실내온도는 국내의 통상적인 난방 조건으로 가정하여 Table 3과 같이 설정하였다. 중앙코어 방식 계단실의 경우 평상시에는 외기온도의 영향을 덜 받지만, 급기 시에는 외기온도의 영향을 받는 것으로 가정하였다. 이에 따라 화재로 급기가압 후 계단실 온도는 급기되는 차가운 외기에 의해 점차 5°C, -5°C, -10°C, -15°C로 낮아지는 것으로 설정하였다.

급기가압 제연 시에는 각 층마다 동일 사이즈의 댐퍼를 통해 다중주입 방식으로 급기되는 것으로 가정하였고, 계단실과 옥내와의 최저차압이 40Pa 이상 형성되도록 급기풍량을 적절히 조정하였다. 이때 급기덕트 내의 마찰손실은 무시하였으며, 각 층의 예상 최대차압을 얻기 위하여 과압배출장치는 사용하지 않는 것으로 가정하였다. 피난자의 안전을 위해 계단실의 지하층과 지상층은 상호 구획되는 것으로 가정하였다.

3.3 시나리오 구성

해석 시나리오는 크게 초고층건물에서 계단실 급기가압 제연의 유무, 급기팬의 위치 및 계단실 온도 조건에 따른 차압 분포특성 변화를 살펴보기 위하여 Figure 2와 같이 구성하였다. 급기팬의 위치에 따른 계단실 차압분포의 변화를 알기 위하여 급기팬의 위치를 단독상부, 단독하부 그리고 상·하부 동시 급기가압의 세 가지 방식에 대한 해석을 수행하였다.

상·하부 동시 급기가압 시 상부와 하부 팬의 풍량은 동일하게 적용하였다. Table 4는 본 시뮬레이션에

**Figure 2.** Flow chart for the scenarios.**Table 4.** Air Injection Conditions

Description	Condition
Inlet Flow Rate	2.8 (min.)~11.7 (max.) m ³ /sec
Inlet Damper Size	0.6 m × 0.4 m
Inlet Duct Size	1.5 m(W) × 0.3 m(H)
Inlet Air Temp	-15°C

적용된 급기가압 조건을 표로 나타낸 것이다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 계단실 비급기가압 시 차압분포- Case 1

평상시(비화재 시)에는 계단실 급기가압이 이루어지지 않으며, 실내의 온도차와 층고에 의해 단지 초고층 연돌효과만 발생한다. Figure 3은 직통 계단실과 EV샤프트에 있어서 비 급기가압 시 연돌효과로 인한 옥내와의 차압분포 특성을 나타내었다. 계단실과 EV샤프트의 위치와 누설틈새는 다르지만 동일 실내온도로 인해 차압분포 및 중성면의 위치는 계단실과 EV샤프트가 거의 흡사한 양상을 나타내고 있다(여기서, ΔP_{SO} 는 계단실과 실내(Office)와의 차압을 ΔP_{EO} 는 EV샤프트와 실내(Office)의 차압임.)

단, 중성면은 출입문 등 각 샤프트에 존재하는 누설틈새 면적의 미소한 차이로 인해 계단실에서는 약 40층, EV샤프트에서는 약 39층에 형성되었다. 이러한 차압특성은 약 39층 이하층에서는 출입문 등 누설틈새를

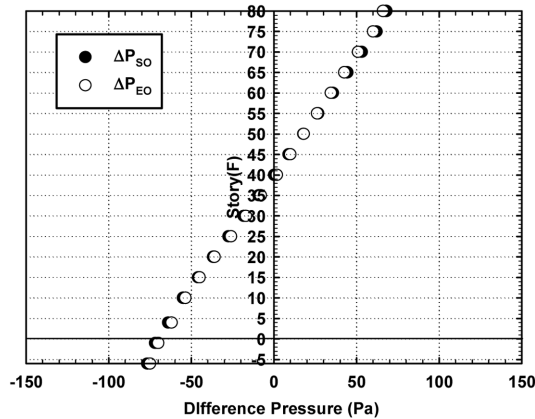


Figure 3. Pressure difference in the 80th story super-tall building due to the stack effect.

통해 옥내 기류가 계단실과 EV샤프트로 침기되고, 이상층에서는 계단실, EV샤프트의 기류가 옥내로 누기됨을 나타낸다. 이때 옥내와의 차압 범위는 계단실은 약 $-75\sim+70\text{Pa}$, EV샤프트에서는 약간 작은 $-70\sim+65\text{Pa}$ 정도 발생하는 것으로 나타났다. 이 정도의 차압범위는 정상적인 문 개폐에 영향을 줄 수 있는 정도는 아닌 것으로 판단되었다.

4.2 급기가압 시 계단실 급기팬의 위치에 따른 차압 분포

화재 시 계단실에는 피난안전을 위해 급기가압이 이루어지며, 급기가압 팬의 위치에 따라 통상 1) 단독상부 2) 단독하부 3) 상·하부 동시 방식이 가능하다. 급

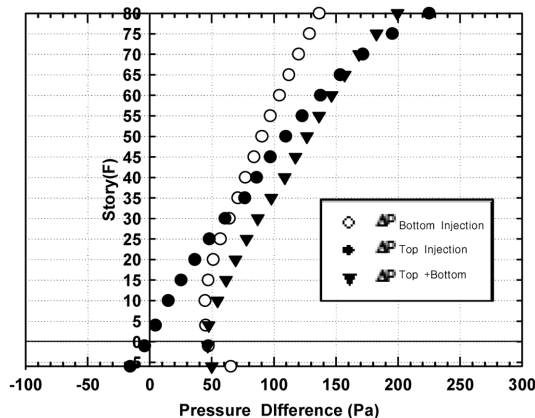


Figure 4. Pressure difference in the stairway with different location of air injection (air temp. of $+15^{\circ}\text{C}$).

기에 필요한 외기는 외기온도 그대로 또는 가열 후 급기가 가능한데, Figure 4는 급기시 외기 가열 등에 의해 계단실 온도가 $+15^{\circ}\text{C}$ 로 유지된다는 가정 하에 급기위치에 따른 옥내와의 차압분포를 나타낸 것이다.

먼저 단독하부급기 조건에서 계단실과 옥내간의 최저기준차압이 40Pa 이상 되도록 급기풍량을 조절하였으며, 단독상부급기의 경우 급기풍량은 앞에서 산출된 단독하부 급기량과 동일한 풍량을 적용하여 해석하였다. 상·하부 동시급기 시에는 상부와 하부에 동일한 급기풍량을 부여하되, 전 층에서 계단실과 옥내간의 최저기준차압 이상으로 유지되도록 하였다.

해석 결과, 급기위치에 관계없이 급기가압에 의한 차압분포는 일부 구간에서 비선형 분포를 나타내고 있으며, 이러한 현상은 급기가 이루어지는 부근에서 더욱 두드러진 것으로 해석되어 급기풍속에 따른 마찰저항 및 기류방향과 크게 관계가 있을 것으로 추정되었다.

단독하부급기 시의 최소차압은 약 지상 10층 정도에 형성되었다. 20층 이하의 지상 저층부에서는 최저기준차압 부근의 분포를 나타내는 반면, 20층 이상의 고층부로 갈수록 차압이 서서히 증가하여 최대차압은 약 137Pa 로 나타났다. 이때 전층이 최저기준차압 이상을 유지하기 위한 하부 급기풍량은 약 $28,000\text{m}^3/\text{hr}$ 로 산출되었다.

하지만, 단독상부급기의 경우 급기풍량을 단독하부급기와 동일 풍량으로 가정함에 따라 Figure 4에서 보는 바와 같이 최저차압이 최저층부에서 약 -20Pa 의 부압을 나타내었을 뿐만 아니라 지상 23층까지도 최저기준차압인 40Pa 에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 최대차압은 최고층인 80층에서 약 225Pa 의 과압이 형성되어 단독하부급기 시보다 60% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 단독상부급기시 계단실내의 연돌효과로 인한 상승기류와 상부급기에 따른 하강기류간의 마찰저항 증대 때문으로 분석되었다.

이에 따라, 단독상부급기 시 전층에 걸쳐 최저기준차압 이상을 얻기 위해서는 $28,000\text{m}^3/\text{hr}$ 보다 더 많은 급기풍량이 필요하며, 이는 최상층에서의 최대차압이 더욱 커지게 됨을 의미한다. 이 경우 고층부에서의 150Pa 이상의 과압을 그대로 방치하게 되면 피난 시 계단실 출입문이나 EEV 도어 개폐에 어려움이 생길 수 있기 때문에 과압배출장치가 반드시 필요하다.

상하부 동시급기의 경우 전층이 최저기준차압 이상 이 되기 위해서는 상,하부 각각의 급기풍량이 각각 $17,640\text{m}^3/\text{hr}$ 이상이 되어야 하는 것으로 산출되었다. 이때 최저차압은 지하 1층 부근에서 형성되었으며, 상

층부로 갈수록 연돌효과로 인해 차압이 점차 증가하여 최상층인 80층에서는 약 200Pa의 최대차압을 나타내었다.

이상의 해석 결과로 볼 때 급기공기의 가열 등으로 인해 계단실 온도가 변하지 않는다는 가정하에서는 초고층건물 전층의 차압 분포 특성 및 급기풍량 크기만을 고려한다면 계단실 급기가압은 단독하부급기 방식이 가장 적합한 것으로 분석되었다.

4.3 급기가압 시 계단실 온도변화에 따른 차압분포

급기가압 시 차가운 외기가 그대로 유입되면 계단실 온도가 점차 변하게 된다. 본 절에서는 이에 따른 계단실과 옥내와의 차압특성 변화를 알기 위하여 하부급기 시 계단실 온도를 초기의 +15°C에서 점차 5°C, -5°C, -10°C, -15°C로 낮아지는 것으로 가정하고 그 해석 결과를 Figure 5에 나타내었다. 단, 최저기준차압 유지를 위한 급기풍량은 +15°C 때의 28,000m³/hr와 동일 급기풍량을 적용하였다. Figure 5에서와 같이 계단실 온도가 점차 하강하게 됨에 따라 실내와의 차압 분포는 크게 달라지는 것으로 나타났다. 계단실온도가 낮아질수록 고층부의 차압은 크게 감소하는 반면, 저층부에서의 차압은 오히려 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그리하여 계단실 온도가 -5°C 이하로 내려가게 되면, 고층부가 아닌 저층부에서 약 125Pa의 최대차압이 형성되었으며, -15°C의 경우 저층부에서 약 170Pa의 최대차압이 형성되는 것으로 나타났다. 이는 계단실 온도와 외기와의 온도차가 점차 작아지고, 실내와의 온도차는 오히려 증가함에 따라 계단실내 연돌효과가 점차 감소하거나 오히려 역연돌효과가 나타나기 때문으로 추정되었다.

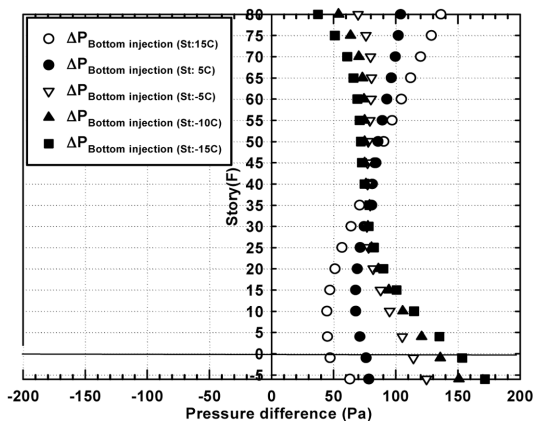


Figure 5. Pressure difference with the change of stairway temperature due to the air supply.

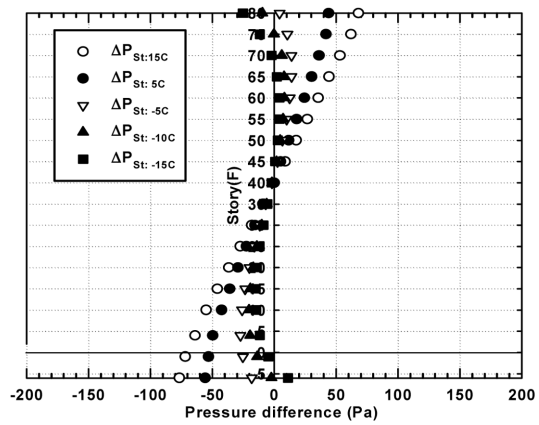


Figure 6. Pressure difference with the change of stairway temperature at non-pressurization.

Figure 5의 결과에 나타난 바와 같이 건물 전층의 차압분포가 가장 균일하게 나타난 급기온도는 +5°C일 경우로 분석되었으며, 이때의 각 층에서의 차압범위는 약 60Pa~100Pa로서 전체적으로 약간의 과압이 예상되었으나 최저차압기준 및 재실자의 계단피난 측면에서 가장 유리할 것으로 판단되었다. 이로 판단할 때 중앙코어형 초고층건물의 계단실 급기가압 시스템 설계 시에는 급기 시 계단실의 온도를 약 5°C 내외로 유지할 수 있도록 급기가열식 송풍기 등의 설치가 바람직한 것으로 분석되었다. 물론 외기온도가 -15°C가 아닌 경우에 대한 적정 계단실 온도는 추가적인 해석이 필요하다고 본다.

이러한 계단실내 연돌효과의 변화는 Figure 6에서 보는 바와 같이 계단실과 옥외의 온도차가 감소할수록 연돌효과는 점차적으로 감소하여 고층부 및 저층부에서의 최대차압이 점점 줄어들었으며, 계단실의 온도가 더 낮아져 외기온도와 같은 -15°C에 이르게 되면, 계단실에서의 연돌효과는 오히려 일부 고층부에서 부압이 발생하는 비전형 역연돌효과(Reverse Stack-effect)의 차압분포 양상을 보였다. 이는 계단실을 둘러싸고 있는 중앙코어 방식의 건물의 경우 상온인 실내와 저온의 계단실과의 온도차로 인해 나타나는 차압특성 때문으로 추정된다.

Figure 7은 급기위치 및 계단실 온도별로 최저기준 차압유지 시 소요되는 총급기풍량을 산출하여 나타낸 것이다. 계단실 온도 -5°C까지는 단독상부급기 > 상하부동시급기 > 단독하부급기의 순으로 단독하부급기 방식의 소요급기량이 가장 적지만, -10°C에서는 단독하부급기나 상하부동시급기 방식의 경우 소요급기량 측

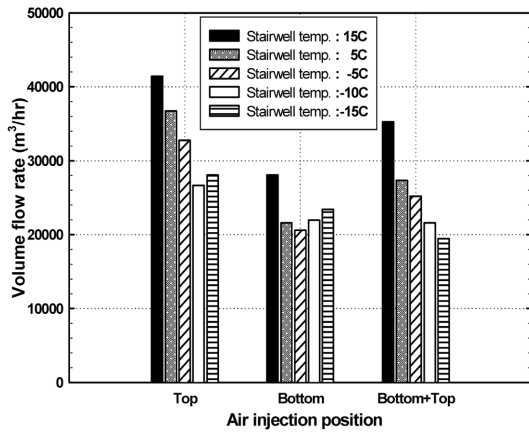


Figure 7. Required volume flow rate to the stairway with air injection position change.

면에서 별 차이가 나지 않는 것으로 분석되었다.

단독하부급기로 최소기준차압 이상을 유지하기 위해서는 급기 초기에는 약 28,000m³/hr 이상의 급기풍량이 필요하였으나, 차가운 외기유입으로 계단실 온도가 +5°C, -5°C로 내려갈 경우에는 계단실 연돌효과 감소로 인해 최소소요풍량이 각각 22,000, 20,000m³/hr 정도로 감소하는 것으로 나타났다. 계단실 온도가 -10°C, -15°C로 더 내려갈 경우에는 소요풍량이 약 23,000m³/hr, 24,000m³/hr로 다시 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 앞서 분석된 바와 같이 계단실과 옥내와의 역연돌효과로 인한 고층부에서의 부압에 따른 실내공기의 유입 때문인 것으로 예측되었다.

Figure 8은 급기가압이 일정시간 경과하여 계단실 온

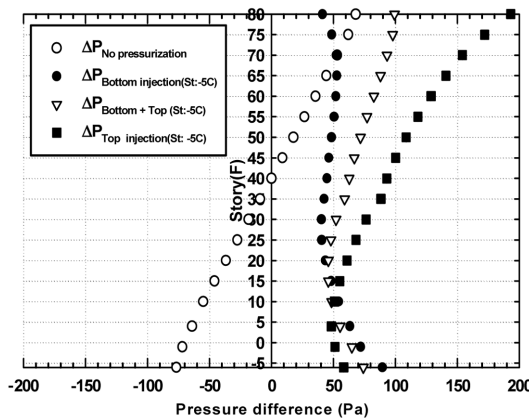


Figure 8. Pressure difference in the stairway with air pressurization (air temp. of -5°C).

도가 -5°C일 경우로 가정하였을 경우에 연돌효과를 고려한 급기위치 별 차압분포 특성을 나타낸 것으로서, 전층에 걸친 균압형성 측면에서 볼 때 단독하부급기 방식이 상,하부층의 과압저감 및 최저차압 제어측면에서 가장 유리함을 나타낸다. 다만, 상하부동시급기의 경우 단독하부급기에 비해 급기 초기의 총소요풍량은 약간 많지만 총소요풍량의 1/2 용량인 2대의 송풍기로 나누어서 공급하기 때문에 경제성이나 공간 크기 측면에서 유리할 수가 있으며, 이에 대해서는 별도의 평가가 이루어져야 한다고 본다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 중앙코어형 구조의 80층 초고층건물에서 평상시 연돌효과와 화재로 계단실 단독 급기가압 제한 시 급기 위치 및 급기에 따른 계단실 온도 조건에 따른 연돌효과의 차압특성 변화에 대한 분석 결과는 다음과 같다.

첫째, 80층 초고층건물에 있어서 동절기 연돌효과에 따른 최대차압은 약 75Pa로 외부 풍속이 없을 시에는 별 문제가 되지 않았다.

둘째, 다만 화재로 계단실 단독 급기가압 시에는 급기가압 팬의 위치에 따라 급기 초기에 최대 약 225pa의 차압이 발생할 수 있으며 이를 해소하기 위한 적절한 과압배출장치나 대책이 필요하였다. 또한, 단독하부급기 방식이 최대차압의 크기와 분포 특성 및 최소설계차압 유지를 위한 소요풍량 면에서 가장 유리하였다. 다만 상·하부급기방식도 초기 소요급기풍량은 약 25% 정도 많지만, 총소요풍량의 1/2 용량인 2대의 송풍기로 나누어서 공급할 수 있기 때문에 경제성이나 공간 크기 측면에서 유리하다. 단독 상부급기방식은 소요급기풍량이나 차압분포 특성을 고려할 때 우리나라 특성에는 가장 적합하지 않는 것으로 나타났다.

셋째, 차가운 외기 급기로 인해 계단실의 온도가 점차 하강하게 되면 계단실 연돌효과의 감소로 인해 소요풍량이 줄어들었으며 고층부에서의 차압은 줄어드는 반면 저층부에서의 차압이 크게 증가하는 양상으로 변화하는 것으로 나타났다. 이는 계단실의 온도 하강으로 최상층부에서의 부압이 형성됨으로서 옥내에서 계단실로 침기되는 역연돌효과가 발생했기 때문으로 분석되었다.

감사의 글

“이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 학술연

구비 지원을 받아 수행된 연구임”(과제번호 20090041).

참고문헌

1. 건축법 시행령, 제34조, “직통계단의 설치”(2009).
2. 국토해양부, “건축물의 피난방화구조 등의 기준에 관한 규칙”(2009).
3. NFSC 501A, “특별피난계단의 계단실 및 부속실 제연설비의 화재안전기준”, 소방방재청(2008).
4. 임채현, 김범규, 여용주, 박용환, “배연창 및 외기풍속이 초고층건축물의 연돌효과에 미치는 영향”, 한국
화재소방학회 논문지, Vol.22, No.4, pp.20-26(2008).
5. 조재훈, “고층 주거건축물에서 연돌효과로 인한 압력 분포 예측 및 평가”, 서울대학교 대학원 박사학위논문(2005).
7. NFPA 101, “Life Safet Code”, pp.101-26(2009).
8. J.H. Klote and J.A. Mike, “Principles of Smoke Management”, ASHRAE(2002).
9. NFPA 92A, “Standard for Smoke-Control Systems Utilizing Barriers and Pressure Differences”(2009).
10. NISTIR 7251, “CONTAMW 2.4c User Guide and Program Documentation”, NIST(2008).