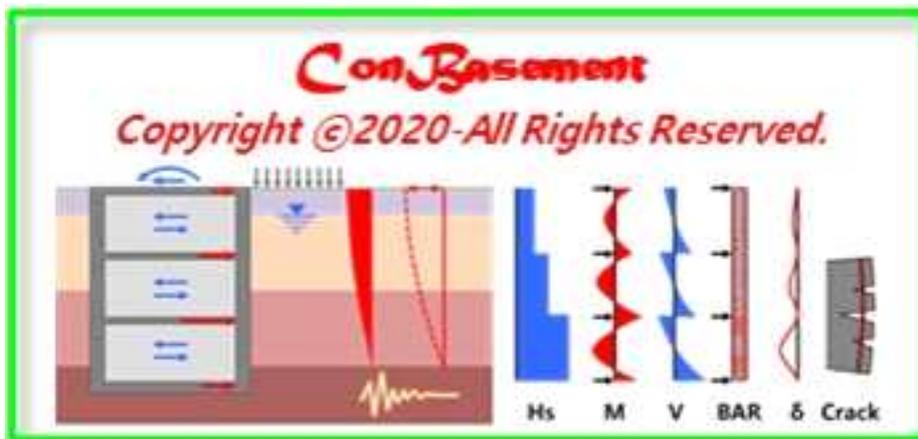


건축물의 지하구조 내진설계 프로그램 **ConBasement**에 대한
지하외벽시스템의 면내 전단력 분포 분석과 검증

2020년 5월 7일



ConBasement(ver20-1)

머리말

일반적으로 건축물의 지하구조는 내부 모멘트골조, 지하층을 둘러싼 지하외벽 및 바닥격막으로 구성되어 있다. 지하구조에서 모멘트골조는 지하외벽에 비해 횡력저항강성이 현저히 작기 때문에 대부분의 횡력은 지하외벽시스템으로 전달된다. 이러한 배경으로 건축구조기준 14.6(6)에서도 “지하구조에 대한 근사적인 설계방법으로, 설계지진토압을 포함하는 모든 횡하중을 횡하중에 평행한 외벽이 지지하도록 설계할 수 있다.”라고 기술하고 있다. 이를 근거로 하여 지하구조의 지진력저항시스템은 지하층을 둘러싼 지하외벽으로 구성된 전단벽시스템이 층전단력의 100%를 저항한다고 간주할 수 있으므로 ConBasement에서도 내부모멘트골조의 구조요소는 무시하고 해석한다.

지하외벽구조의 내진설계는 지상구조물의 안전에도 큰 영향을 주므로 중요한 설계분야이다. 또한 국내의 지하외벽의 배치형상은 매우 다양하며 비정형인 경우가 많다. 따라서 ConBasement에 의한 지하외벽의 소요설계전단력 산정결과를 검증할 필요가 있다.

비정형으로 배치된 지하외벽의 전단력분포도 명확하게 검증할 수 있도록 다음과 같이 지하외벽 배치 형상들을 설정하여, ConBasement에 의한 전단력 분포결과를 검증하였다.

[지하외벽 배치형상]

- 검증 1. 원형으로 배치된 지하외벽구조시스템
- 검증 2. 정3각형으로 배치된 지하외벽구조시스템
- 검증 3. 정8각형으로 배치된 지하외벽구조시스템
- 검증 4. 별모양 다각형으로 배치된 지하외벽구조시스템
- 검증 5. 계단형상(0도 및 90도)으로 배치된 지하외벽구조시스템

[해석 방법]

각 전단벽의 전단력을 산정하는 방법은 건축물의 지하구조 내진설계 지침(대한건축학회, Rev.1)의 8.1(5)에 규정한 “지하구조물에 작용하는 지진동하중은 무한강성의 슬래브 다이어프램으로 연결된 지하벽체가 지지하는 것을 원칙으로 한다.”를 근거로 하여 횡력에 대한 해당 층 각 전단벽의 횡변위가 동일하다는 가정과 전단벽의 상대강성을 이용한다. 또한, 전단벽의 면외강성은 구조해석에 고려하지 않는 조건으로 한다. 횡력에 대한 전단벽시스템 해석에는 탄성해석법을 사용하였다.

[검증 방법]

ConBasement의 해석결과를 전통적으로 사용하고 있는 횡력분배를 위한 이론적 해석방법에 의한 산정결과와 국내에 널리 사용하고 있는 범용 해석프로그램의 산정결과들을 상호 비교하여 검증한다.

[비교 기준값]

Excel을 이용한 이론적 해석방법(부록-1 참조)에 의해 산정한 결과를 기준으로 한다.

목차

1. 원형으로 배치된 지하외벽구조시스템
2. 정3각형으로 배치된 지하외벽구조시스템
3. 정8각형으로 배치된 지하외벽구조시스템
4. 별모양 다각형으로 배치된 지하외벽구조시스템
5. 계단형상(0도 및 90도)으로 배치된 지하외벽구조시스템
6. 결론

[부록-1] 전단벽의 횡력 분배를 위한 이론적 해석방법에 사용한 식

[부록-2] Excel에 의한 이론적 해석 예

원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석

[부록-3] Excel에 의한 이론적 해석 예

원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심(5m)이 있는 X방향 층전단력에 대한 해석

[부록-4] Excel에 의한 이론적 해석 예

별모양 배치 지하외벽(16개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석

[부록-5] Excel에 의한 이론적 해석 예

계단식 배치 지하외벽(20개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석

1. 원형으로 배치된 지하외벽구조의 전단력 분포

규모 및 형상

- 지상 구조물 1동
- 벽의 배치형상 : 원형, 직경 = 60 m
- 지하층 : 지하 2개 층
- 지하1층 높이 : 5.0 m
- 지하2층 높이 : 4.0 m

적용하중

- 지상구조물 관성력에 의한 밑면의 전단력과 전도모멘트 : V4, V5
- 지하구조물의 관성력 : V3
- 지하외벽에 작용하는 지진토압 : V2
- 지하외벽에 작용하는 정적토압 : V1

이 하중영향에 의한 횡력(층전단력)은 ConBasement에서 V1, V2, V3, V4, V5로 나타냄.

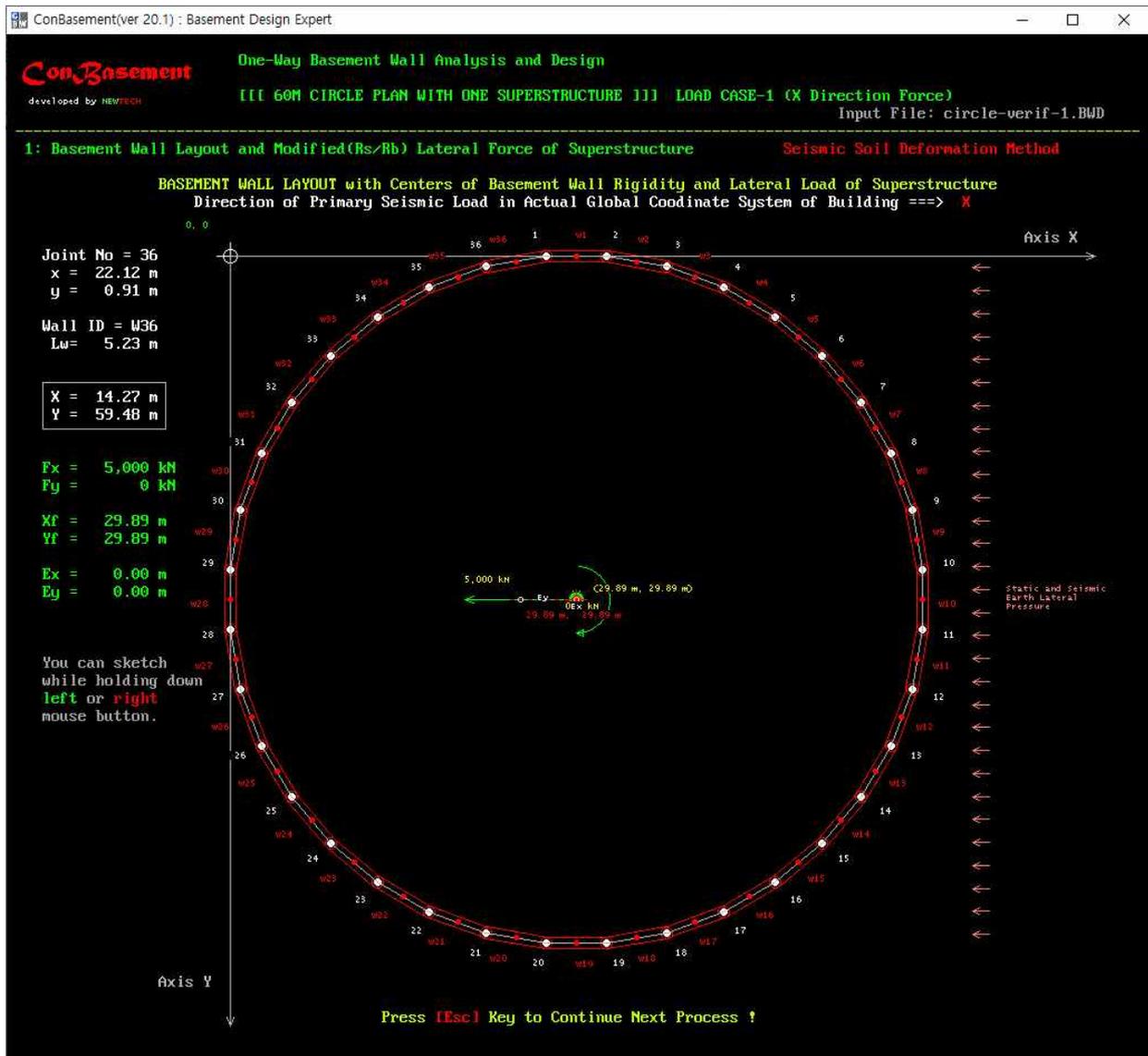


그림1-1. ConBasement의 X방향 하중에 대한 해석모델 (분할요소 총36개)



그림1-2. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

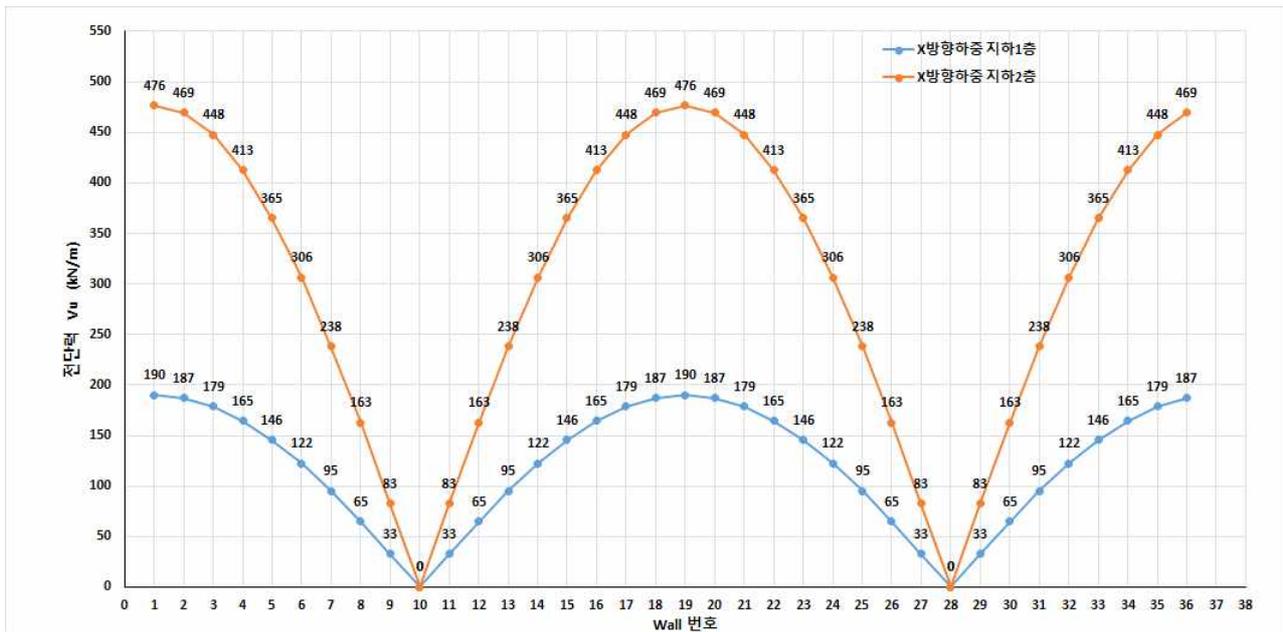


그림1-3. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

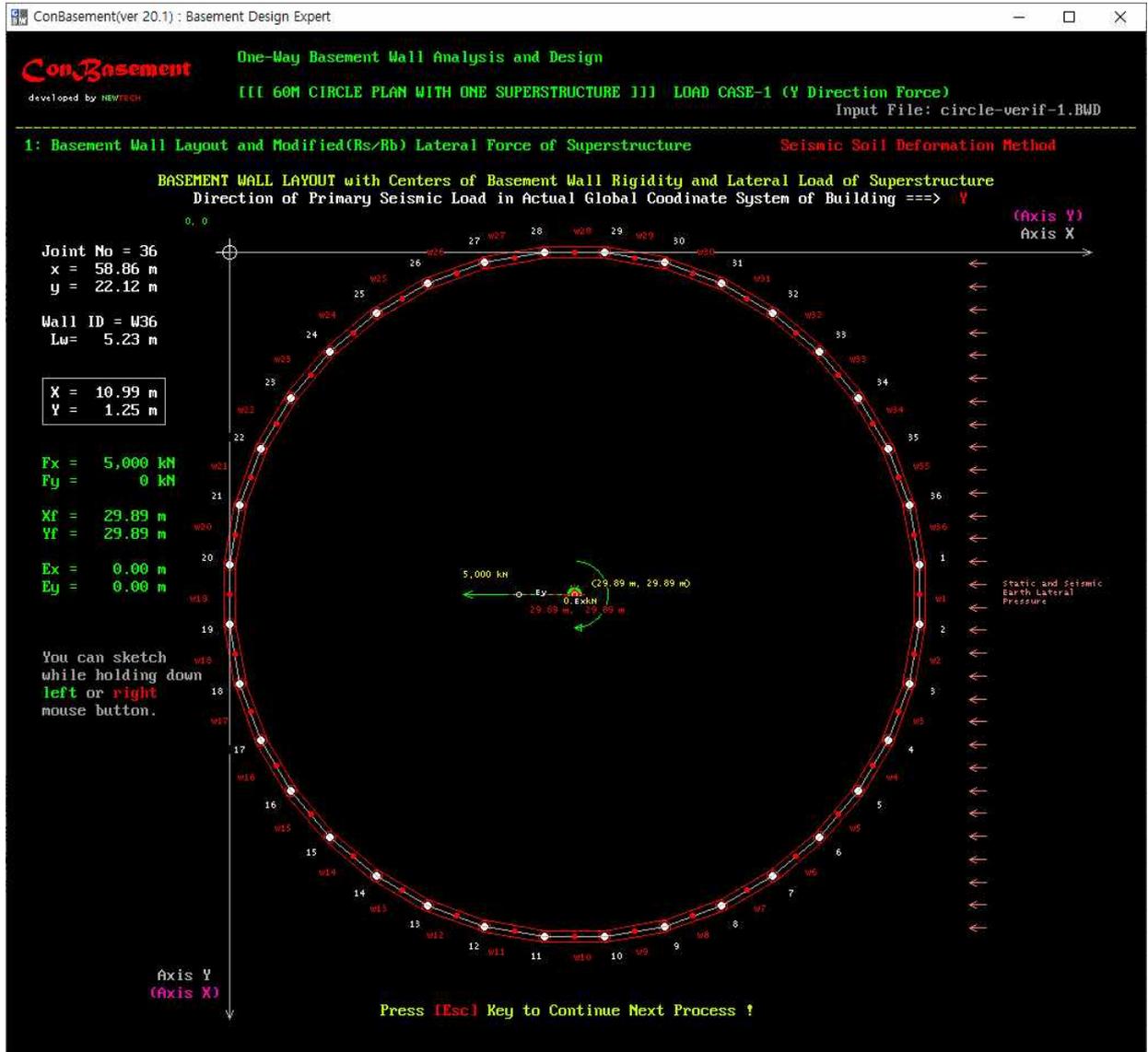


그림1-4. ConBasement의 Y방향 하중에 대한 해석모델 (분할요소 총36개)

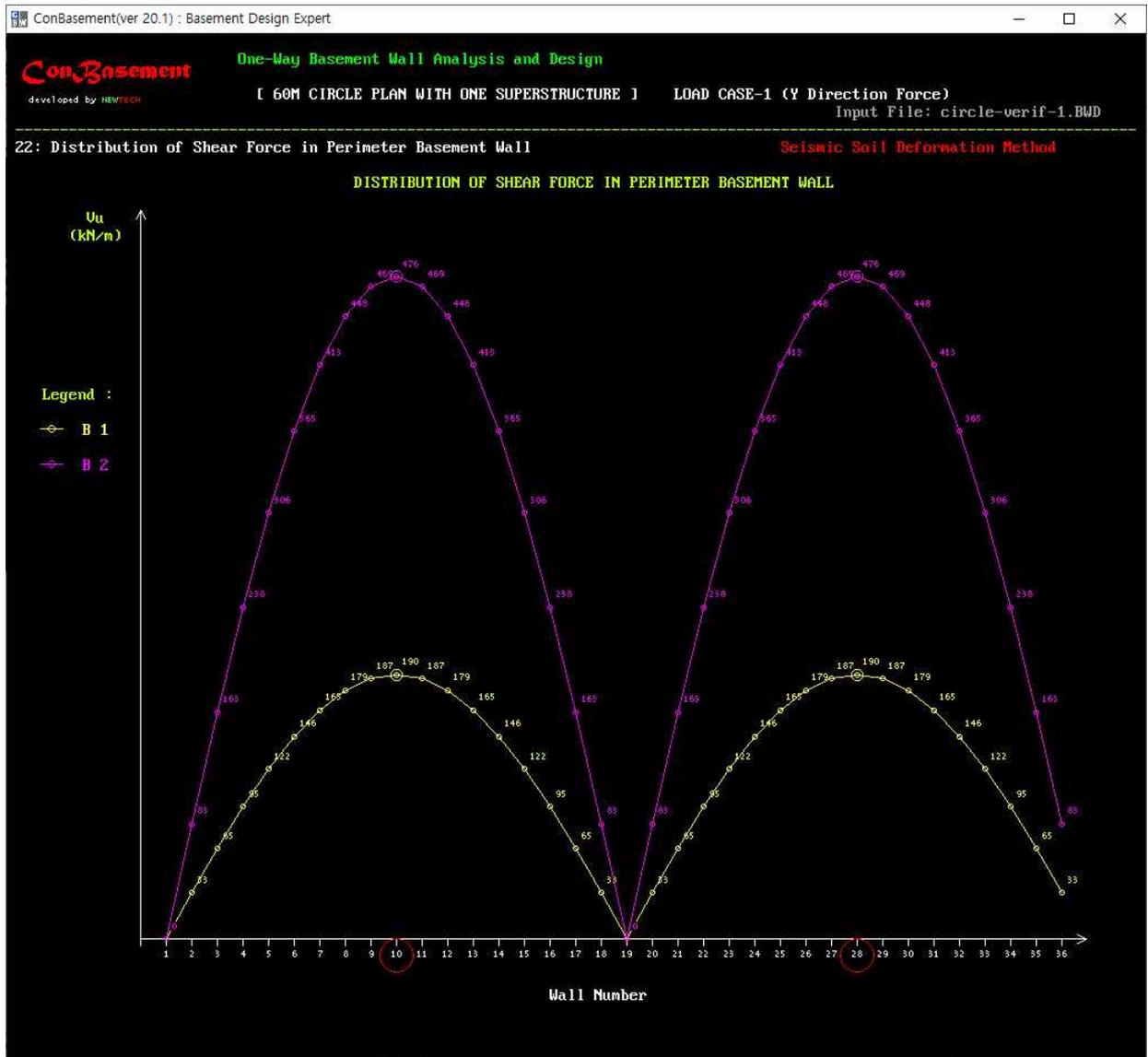


그림1-5. ConBasement의 Y방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

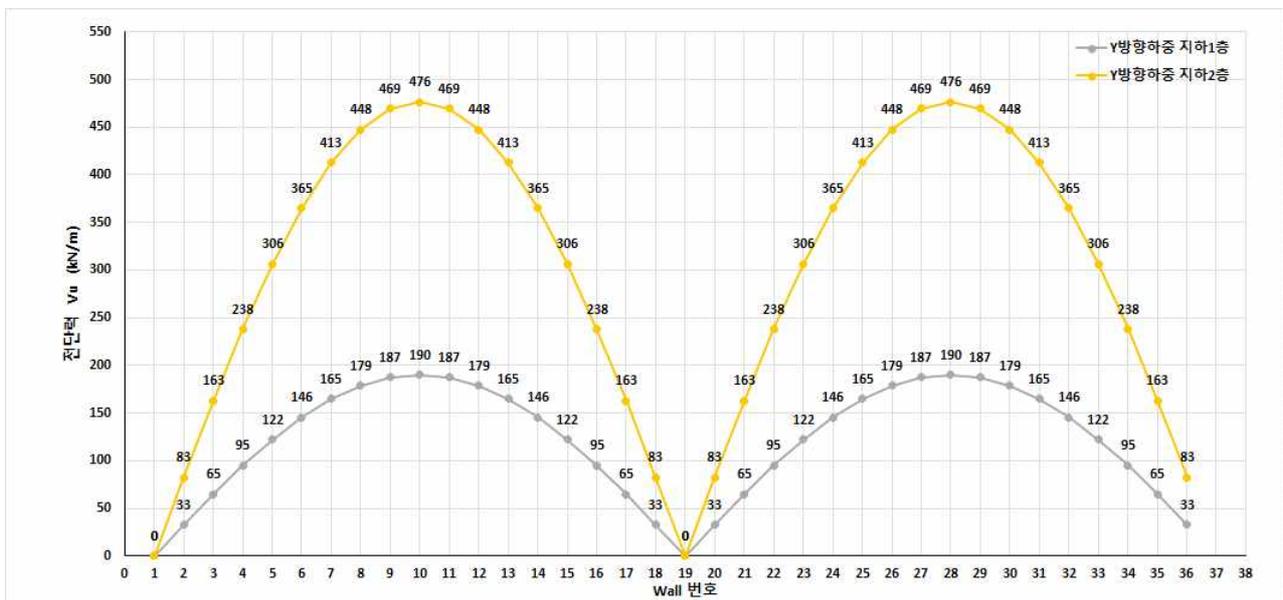


그림1-6. ConBasement의 Y방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

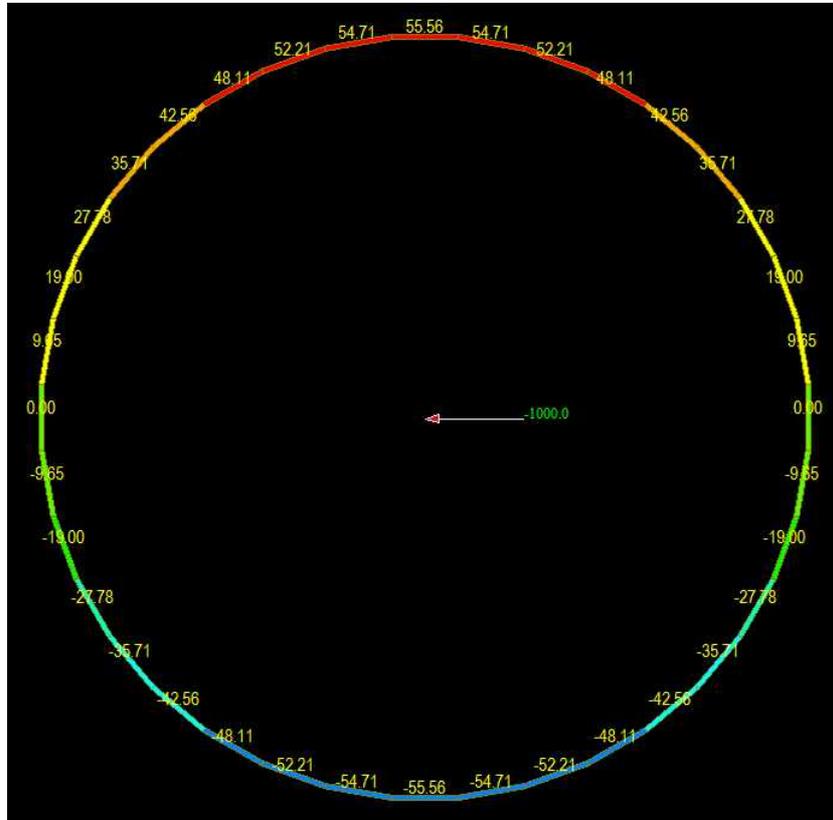


그림1-7. M사 범용 해석프로그램 (분할요소 총36개)

표1-1. 지하1층 총전단력 입력하중(kN)

ConBasement						M 해석프로그램	Theory
V1	V2	V3	V4	V5	ΣV(i)		
2816.93	1336.93	428.27	5000	8333.33	17915.46	1000	17915.46

입력 하중비 = ConBasement/M = 17915.46/1000 = 17.91546

표1-2. 지하1층 원호의 1/4에 해당하는 분할 벽요소의 전단력 산출결과 비교

벽요소 부호	범용 해석프로그램(M사)				Theory	ConBasement	결과 비교		
	전단력	요소길이	단위길이당 전단력	환산값			M/Theory	Con/Theory	Con/M
	kN	m	kN/m	kN/m			비율	비율	비율
W1	55.56	5.22934	10.62467	190.3	190.156	190.162	1.0013	1.000033	0.9990
W2	54.71	5.22934	10.46212	187.4	187.267	187.273	1.0013	1.000033	0.9991
W3	52.21	5.22934	9.984052	178.9	178.688	178.694	1.0013	1.000034	0.9990
W4	48.11	5.22934	9.200014	164.8	164.680	164.686	1.0013	1.000038	0.9992
W5	42.56	5.22934	8.138694	145.8	145.668	145.673	1.0013	1.000036	0.9991
W6	35.71	5.22934	6.828778	122.3	122.230	122.234	1.0013	1.000035	0.9991
W7	27.78	5.22934	5.312334	95.2	95.078	95.081	1.0013	1.000033	0.9990
W8	19	5.22934	3.633346	65.1	65.037	65.039	1.0013	1.000029	0.9992
W9	9.65	5.22934	1.845357	33.1	33.020	33.021	1.0013	1.000024	0.9988
W10	0.0	5.22934	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0

ConBasement의 해석값은 최대 오차 +0.0038%, M사 프로그램의 해석값은 최대 오차 +0.13%가 발생하였다. 환산값 = (단위길이당 전단력) x (입력 하중비)

[부재설계 유의사항]

원형 배치 지하외벽의 경우, 다음 그래프(그림1.8)에 나타난 바와 같이 지하외벽의 각 분할 요소에 작용하는 소요설계전단력의 분포는 원형관 단면의 전단응력분포와 같은 양상을 띠고 있다.

다음 그래프에서 아래 두 곡선은 지하 1층 외벽의 X방향 하중 및 Y방향 하중에 대한 각 벽요소에 분포된 전단력의 크기이고, 위 두 곡선은 지하 2층 외벽의 X방향 하중 및 Y방향 하중에 대한 각 벽요소에 분포된 전단력의 크기이다.

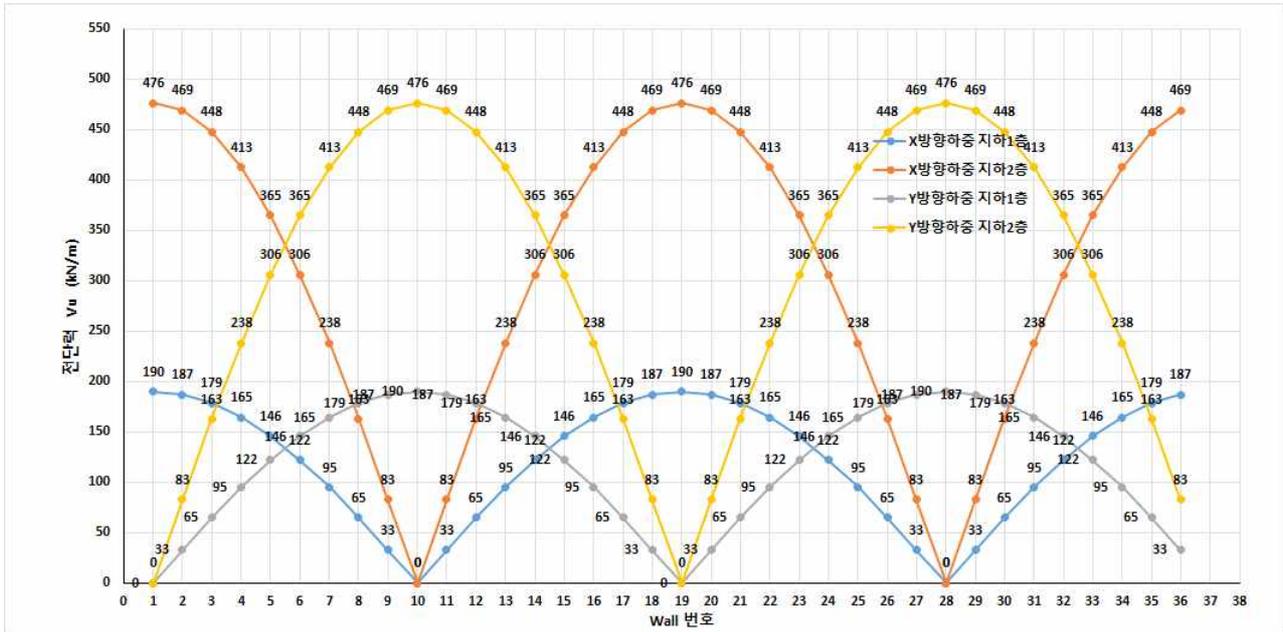


그림1-8. ConBasement의 X 및 Y 방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

위 그래프처럼 일반적으로 실무의 편의를 위해서 전체좌표계에서 X방향과 Y방향에 대해서만 해석하고 부재를 설계한다. 그러나 원형 배치 지하외벽의 경우, 모든 방향(360도)에 대해 각각 해석하면 최대값은 각 방향에 대해 동일하며 모든 요소는 결국 동일한 최대값을 갖게 된다. 따라서 이러한 경우의 지하외벽은 벽의 평면적 위치를 구분하지 않고 최대전단력이 작용하는 벽을 기준하여 통일된 일정한 단면으로 설계하는 것처럼, 복잡한 다각형으로 배치된 지하외벽도 X방향과 Y방향 횡력에 대한 해석만할 경우에는 최대전단력이 작용하는 벽을 기준하여 통일된 일정한 단면으로 설계할 필요가 있다.

편심으로 작용하는 횡력에 의한 비틀림 모멘트에 대한 전단력 검증

복잡한 비정형으로 배치된 지하외벽에 대한 비틀림 전단을 명확하게 검증하는 것은 쉽지 않다. 원형관 단면의 비틀림 전단은 모든 요소에 일정한 값으로 분포되므로 명확하게 검증할 수 있다. 따라서 원형으로 배치된 지하외벽의 비틀림 전단력은 원형관 단면의 비틀림 전단 공식을 이용한 값과 비교 분석하였다.

다음 그림은 지상부의 밑면 전단력과 전도모멘트의 작용 위치가 외벽시스템의 강성 중심에서 5m 편심으로 작용하는 것을 나타낸다.

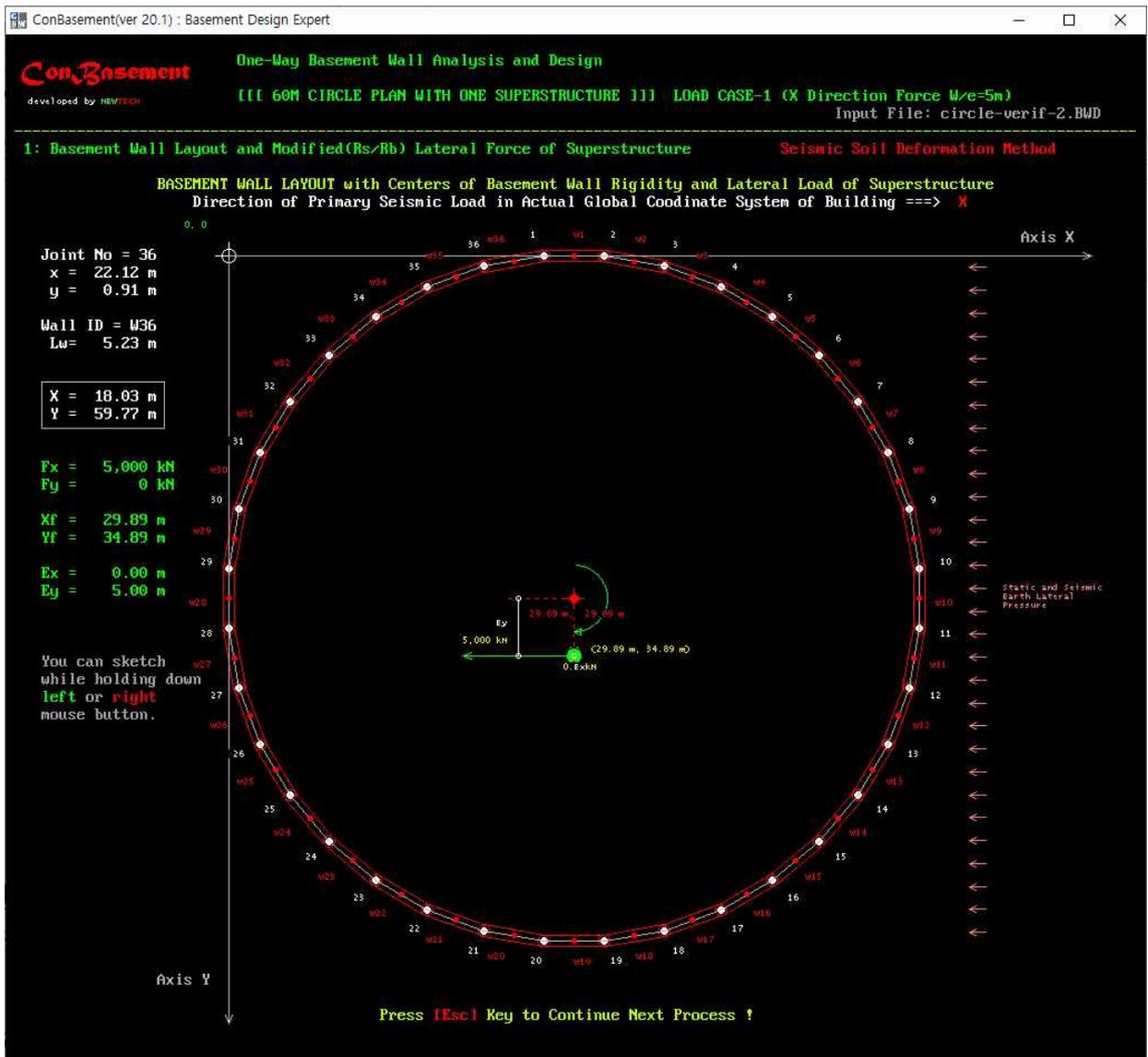


그림1-9. ConBasement의 X방향 편심 하중에 대한 해석모델 (분할요소 총36개)

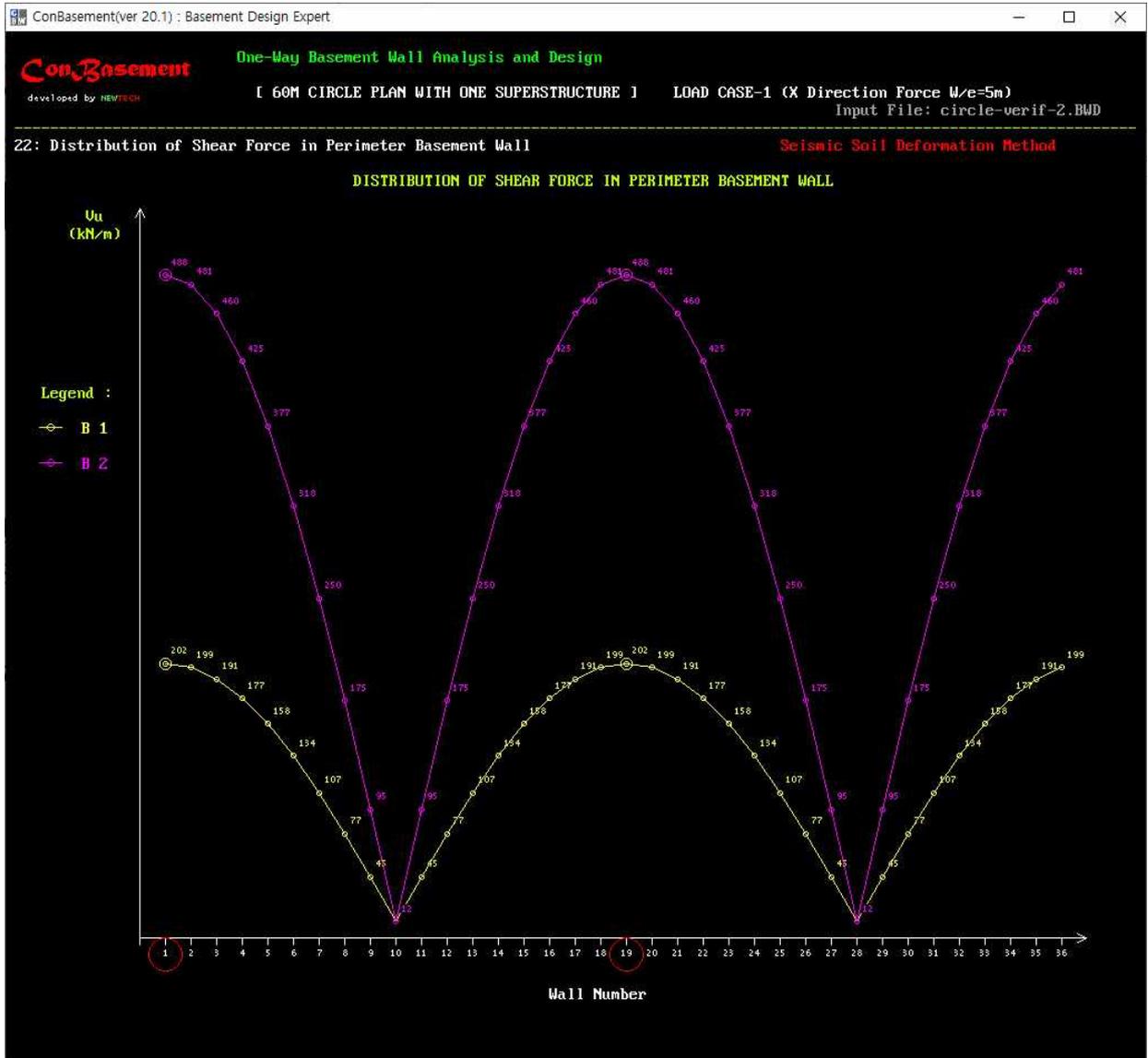


그림1-10. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력(직접 전단 + 비틀림 전단) 분포 Vu(kN/m)

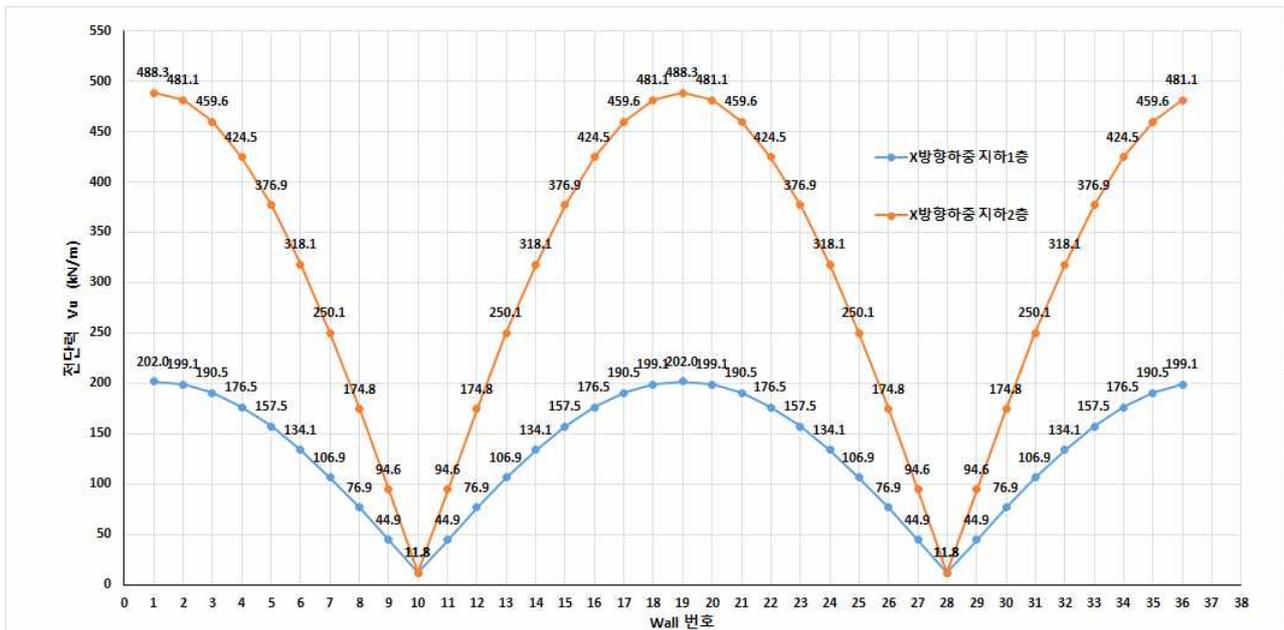


그림1-11. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력(직접 전단 + 비틀림 전단) 분포 Vu(kN/m)

(1) ConBasement에 의한 순비틀림 전단 해석값

$$v = (v_4 \text{ 및 } v_5 \text{ 영향 전단력})/\text{벽길이} = (23.237+38.728)/5.22934 = 11.849 \text{ kN/m}$$

여기서, v4와 v5는 ConBasement의 해석결과인 비틀림 전단력이다.

v4는 상부구조물의 밑면 편심 전단력에 의한 비틀림 전단력 (kN/m)

v5는 상부구조물의 밑면 편심 전도모멘트에 의한 비틀림 전단력 (kN/m)

(2) 원형관 단면의 순비틀림 전단응력 공식에 의한 해석 값

$$F_x = V_4 + V_5 = 5000 + 8333.33 = 13333.33 \text{ kN}$$

(여기서, V4, V5는 상부구조물의 편심 밑면 전단력과 전도모멘트 영향에 의한 총 전단력)

$$e_y = 5.0\text{m}$$

$$M_t = F_x e_y = 66666.65 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$d = 60 \text{ m}$$

$$r = 30 \text{ m}$$

$$J = \frac{\pi d^3}{4} = 169,646 \text{ m}^3$$

$$v = M_t \frac{r}{J} = 11.789 \text{ kN/m}$$

(3) 순비틀림 전단력 오차 검증

$$\text{ConBasement/Theory} = 11.849/11.789 = 1.005$$

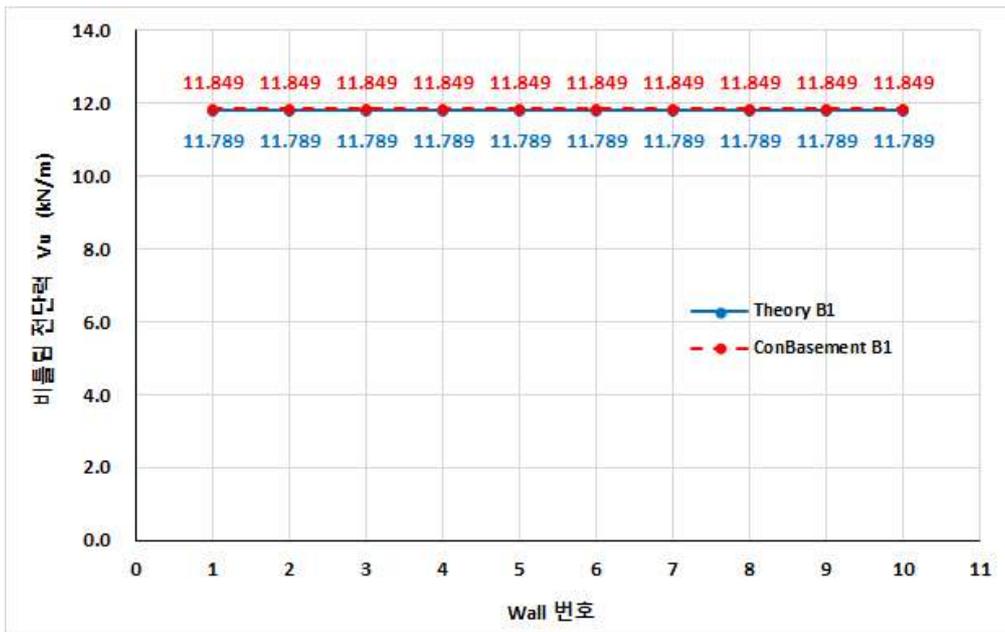


그림1-12. 원호의 1/4에 해당하는 분할 벽요소의 비틀림 전단력 산출결과 비교

ConBasement에 의한 값은 이론값(원형 공식)에 비해 +0.5%의 오차가 발생하지만, 이론값은 원형으로 해석한 결과이고, ConBasement는 각 분할 절점 사이의 직선요소들로 해석하였기 때문에 발생하는 오차이다. 필요시 더 총총하게 분할하면 오차는 줄어들 것이다.

2. 정3각형으로 배치된 지하외벽구조의 전단력 분포

규모 및 형상

- 지상 구조물 1동
- 벽의 배치형상 : 등변 3각형, 각 변의 길이 = 60 m
- 지하층 : 지하 2개 층
- 지하1층 높이 : 5.0 m
- 지하2층 높이 : 4.0 m

적용하중

- 지상구조물 관성력에 의한 밑면의 전단력과 전도모멘트 : V4, V5
- 지하구조물의 관성력 : V3
- 지하외벽에 작용하는 지진토압 : V2
- 지하외벽에 작용하는 정적토압 : V1

이 하중영향에 의한 횡력(층전단력)은 ConBasement에서 V1, V2, V3, V4, V5로 나타냄.

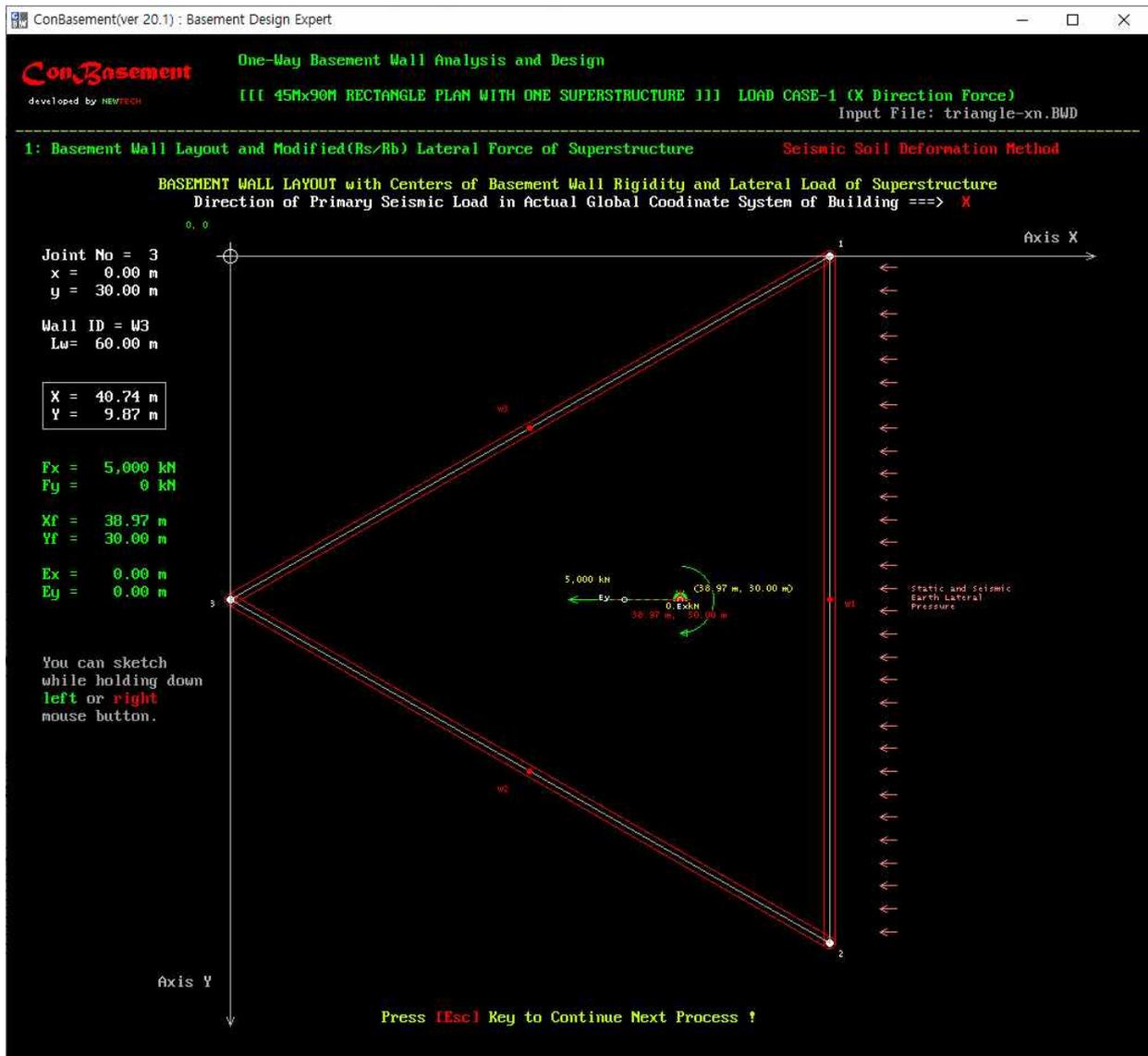


그림2-1. ConBasement의 X방향 하중에 대한 해석모델 (분할요소 총3개)

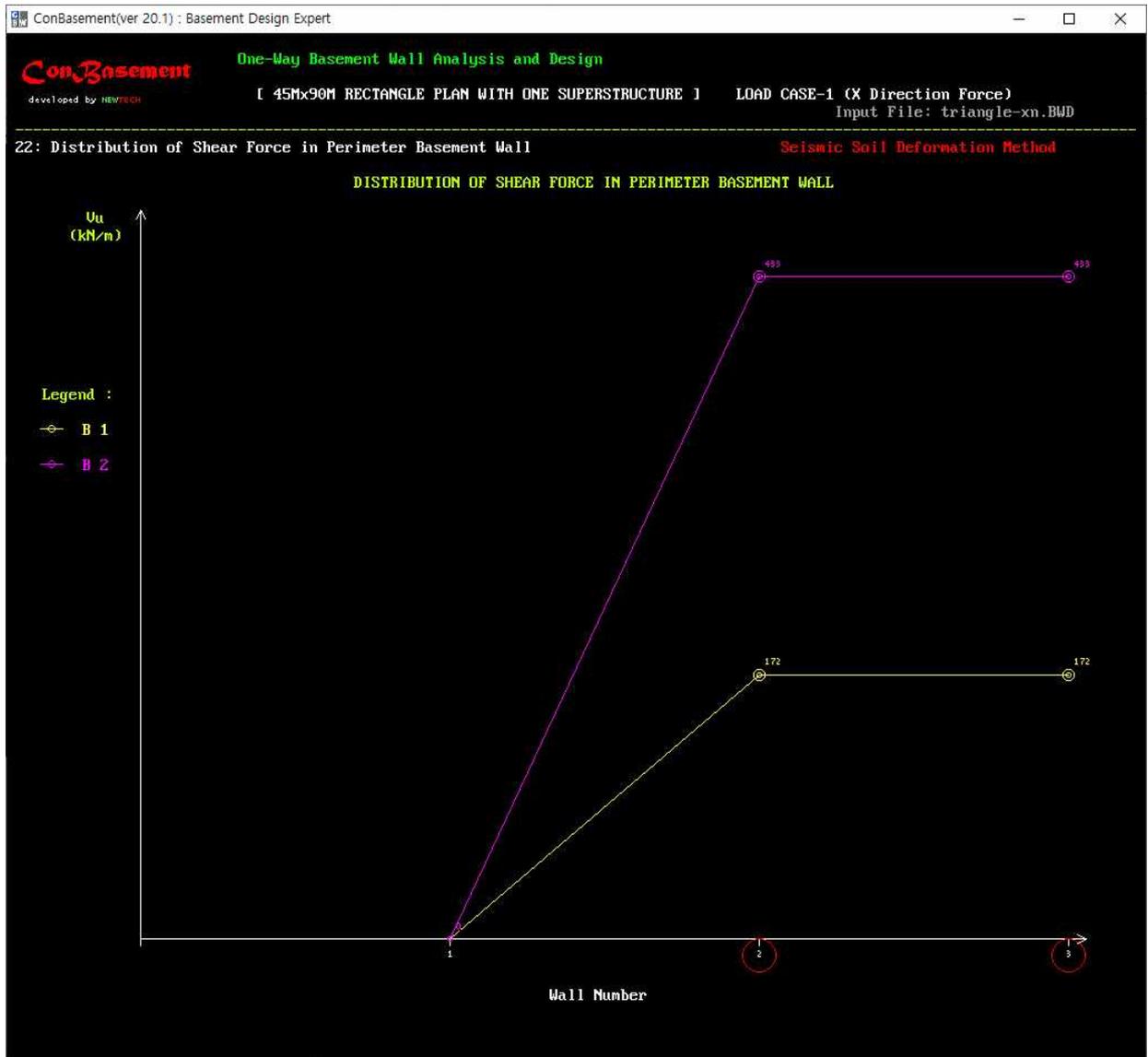


그림2-2. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

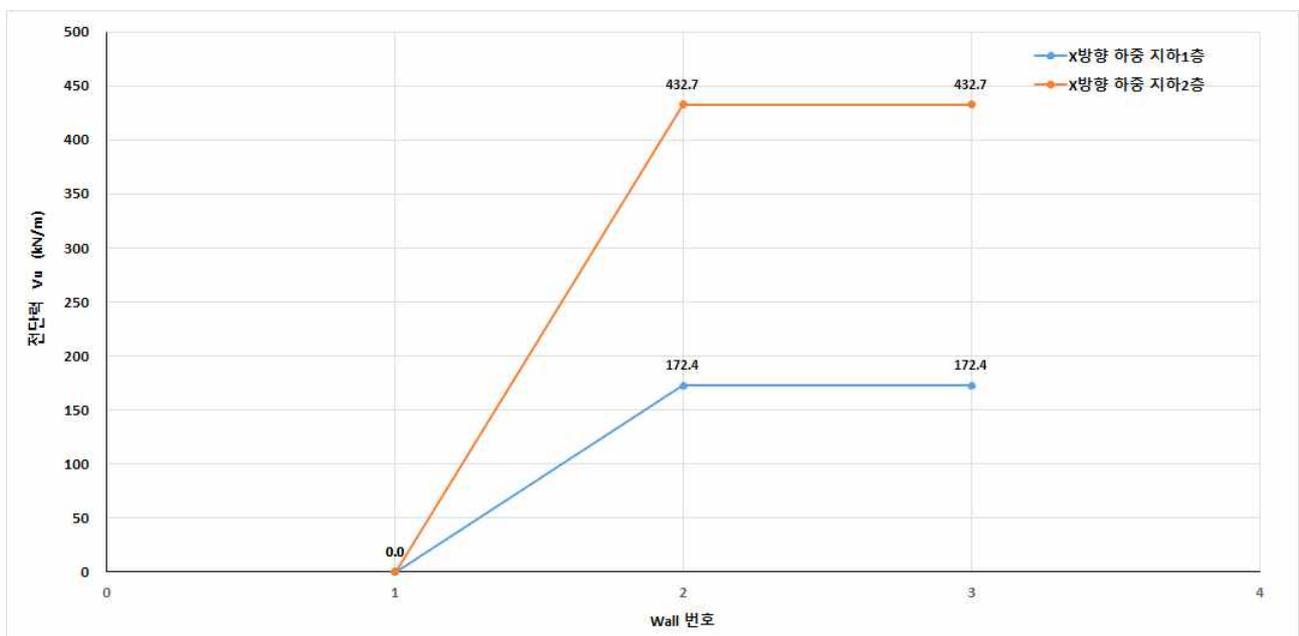


그림2-3. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

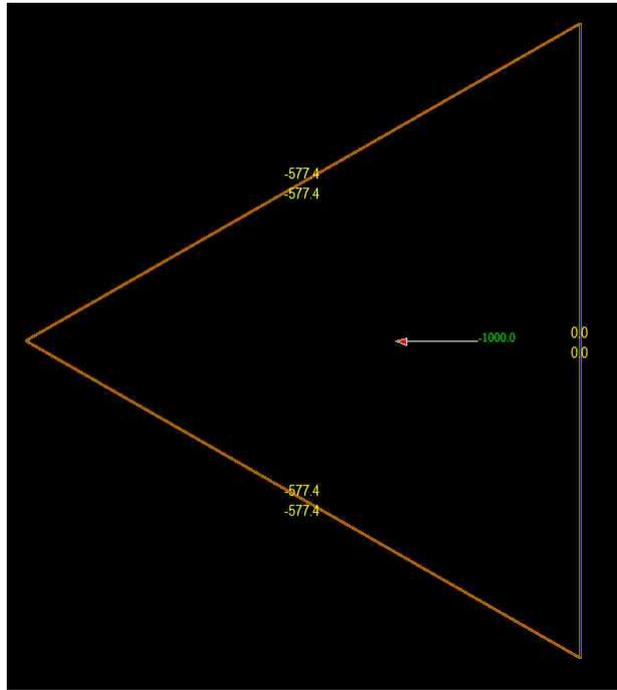


그림2-4. M사 범용 해석프로그램 (분할요소 총3개)

표2-1. 지하1층 층전단력 입력하중(kN)

ConBasement						M 해석프로그램	Theory
V1	V2	V3	V4	V5	ΣV(i)		
2816.93	1336.93	428.27	5000	8333.33	17915.46	1000	17915.46

입력 하중비 = ConBasement/M = 17915.46/1000 = 17.91546

표2-2. 지하1층 각 변의 분할 벽요소의 전단력 산출결과 비교

벽요소 부호	범용 해석프로그램(M사)				Theory kN/m	ConBasement kN/m	결과 비교		
	전단력	요소길이	단위길이당 전단력	환산값			M/Theory	Con/Theory	Con/M
	kN	m	kN/m	kN/m			비율	비율	비율
W1	577.4	60.0	9.62333	172.406	172.392	172.392	1.001	1.0	0.9990
W2	0.0	60.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
W3	577.4	60.0	9.62333	172.406	172.392	172.392	1.001	1.0	0.9990

ConBasement의 해석값은 오차가 발생하지 않았고, M사 프로그램의 해석값은 최대 오차 +0.10%가 발생하였다. 환산값 = (단위길이당 전단력) x (입력 하중비)

3. 정8각형으로 배치된 지하외벽구조의 전단력 분포

규모 및 형상

- 지상 구조물 1동
- 벽의 배치형상 : 등변 8각형, 각 변의 길이 = 24.85218 m
- 지하층 : 지하 2개 층
- 지하1층 높이 : 5.0 m
- 지하2층 높이 : 4.0 m

적용하중

- 지상구조물 관성력에 의한 밑면의 전단력과 전도모멘트 : V4, V5
- 지하구조물의 관성력 : V3
- 지하외벽에 작용하는 지진토압 : V2
- 지하외벽에 작용하는 정적토압 : V1

이 하중영향에 의한 횡력(층전단력)은 ConBasement에서 V1, V2, V3, V4, V5로 나타냄.

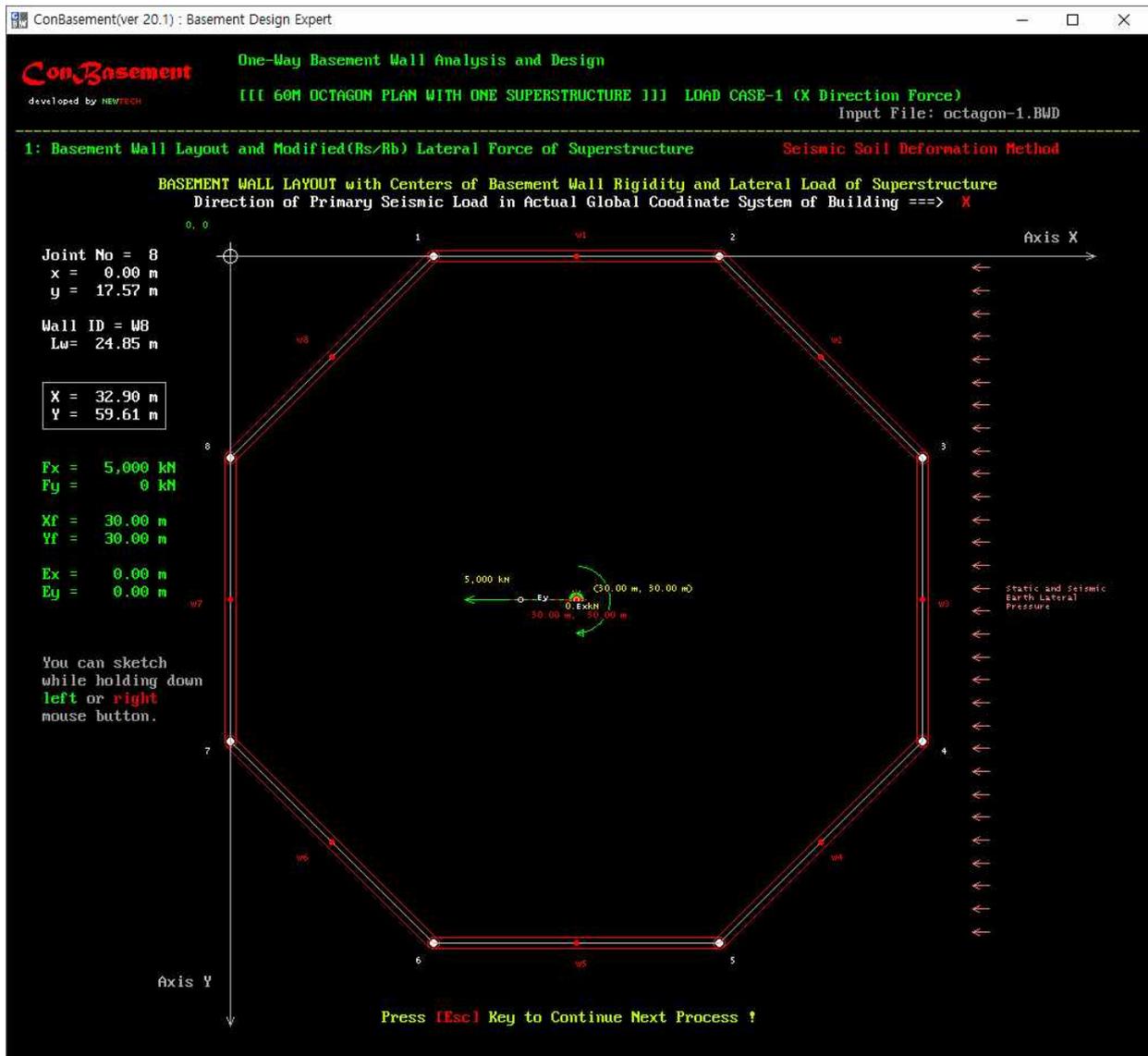


그림3-1. ConBasement의 X방향 하중에 대한 해석모델 (분할요소 총8개)

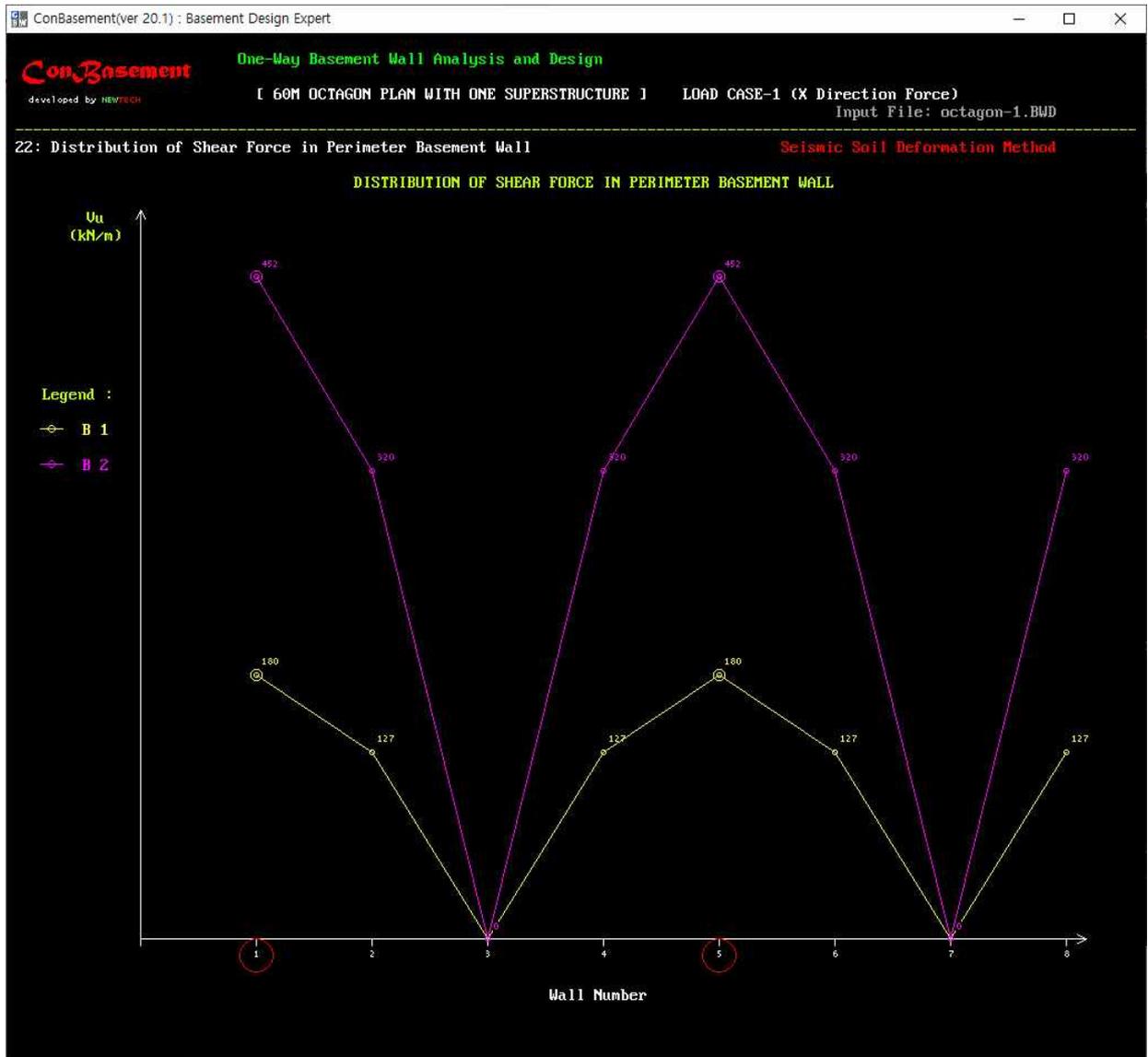


그림3-2. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

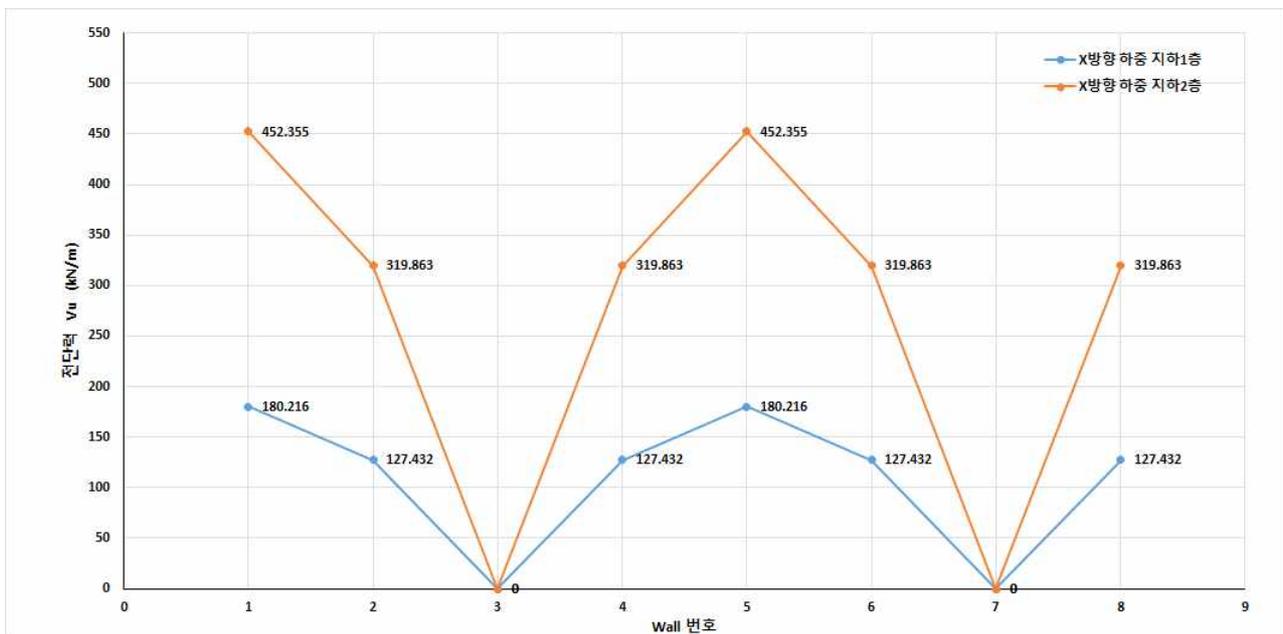


그림3-3. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

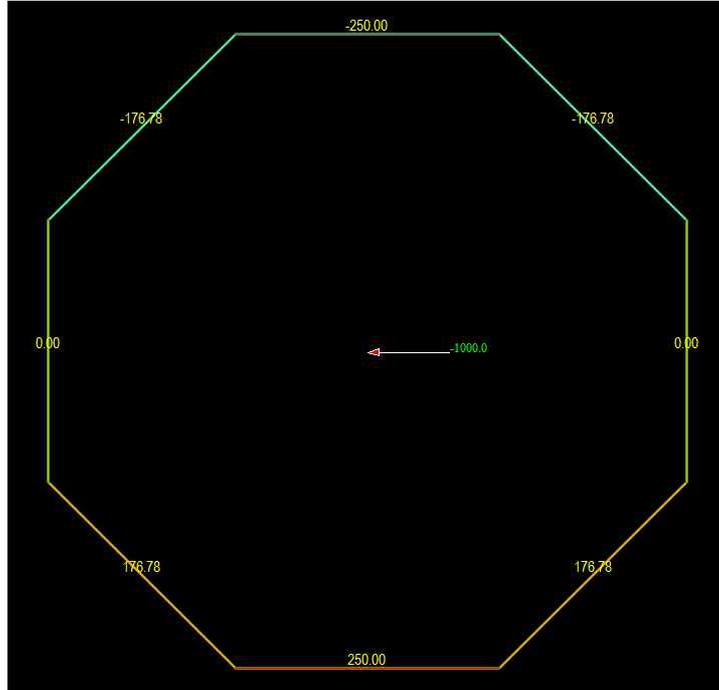


그림3-4. M사 범용 해석프로그램 (분할요소 총8개)

표3-1. 지하1층 층전단력 입력하중(kN)

ConBasement						M 해석프로그램	Theory
V1	V2	V3	V4	V5	ΣV(i)		
2816.93	1336.93	428.27	5000	8333.33	17915.46	1000	17915.46

입력 하중비 = ConBasement/M = 17915.46/1000 = 17.91546

표3-2. 지하1층 각 변의 분할 벽요소의 전단력 산출결과 비교

벽요소 부호	범용 해석프로그램(M사)				Theory	ConBasement	결과 비교		
	전단력	요소길이	단위길이당 전단력	환산값			M/Theory	Con/Theory	Con/M
	kN	m	kN/m	kN/m			비율	비율	비율
W1	250	24.85281	10.05922	180.2156	180.050	180.216	1.00092	1.00092	1.000002
W2	176.78	24.85281	7.113079	127.4341	127.315	127.432	1.00094	1.00092	0.999984
W3	0.0	24.85281	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
W4	176.78	24.85281	7.113079	127.4341	127.315	127.432	1.00094	1.00092	0.999984
W5	250	24.85281	10.05922	180.2156	180.050	180.216	1.00092	1.00092	1.000002
W6	176.78	24.85281	7.113079	127.4341	127.315	127.432	1.00094	1.00092	0.999984
W7	0.0	24.85281	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
W8	176.78	24.85281	7.113079	127.4341	127.315	127.432	1.00094	1.00092	0.999984

ConBasement과 M사 프로그램의 해석값은 동일한 최대 오차 0.09%가 발생하였다.

환산값 = (단위길이당 전단력) x (입력 하중비)

4. 별모양 다각형으로 배치된 지하외벽구조의 전단력 분포

규모 및 형상

- 지상 구조물 1동
- 벽의 배치형상 : 별모양 등변 16각형, 각 변의 길이 = 12.42641 m
- 지하층 : 지하 2개 층
- 지하1층 높이 : 5.0 m
- 지하2층 높이 : 4.0 m

적용하중

- 지상구조물 관성력에 의한 밑면의 전단력과 전도모멘트 : V4, V5
- 지하구조물의 관성력 : V3
- 지하외벽에 작용하는 지진토압 : V2
- 지하외벽에 작용하는 정적토압 : V1

이 하중영향에 의한 횡력(층전단력)은 ConBasement에서 V1, V2, V3, V4, V5로 나타냄.

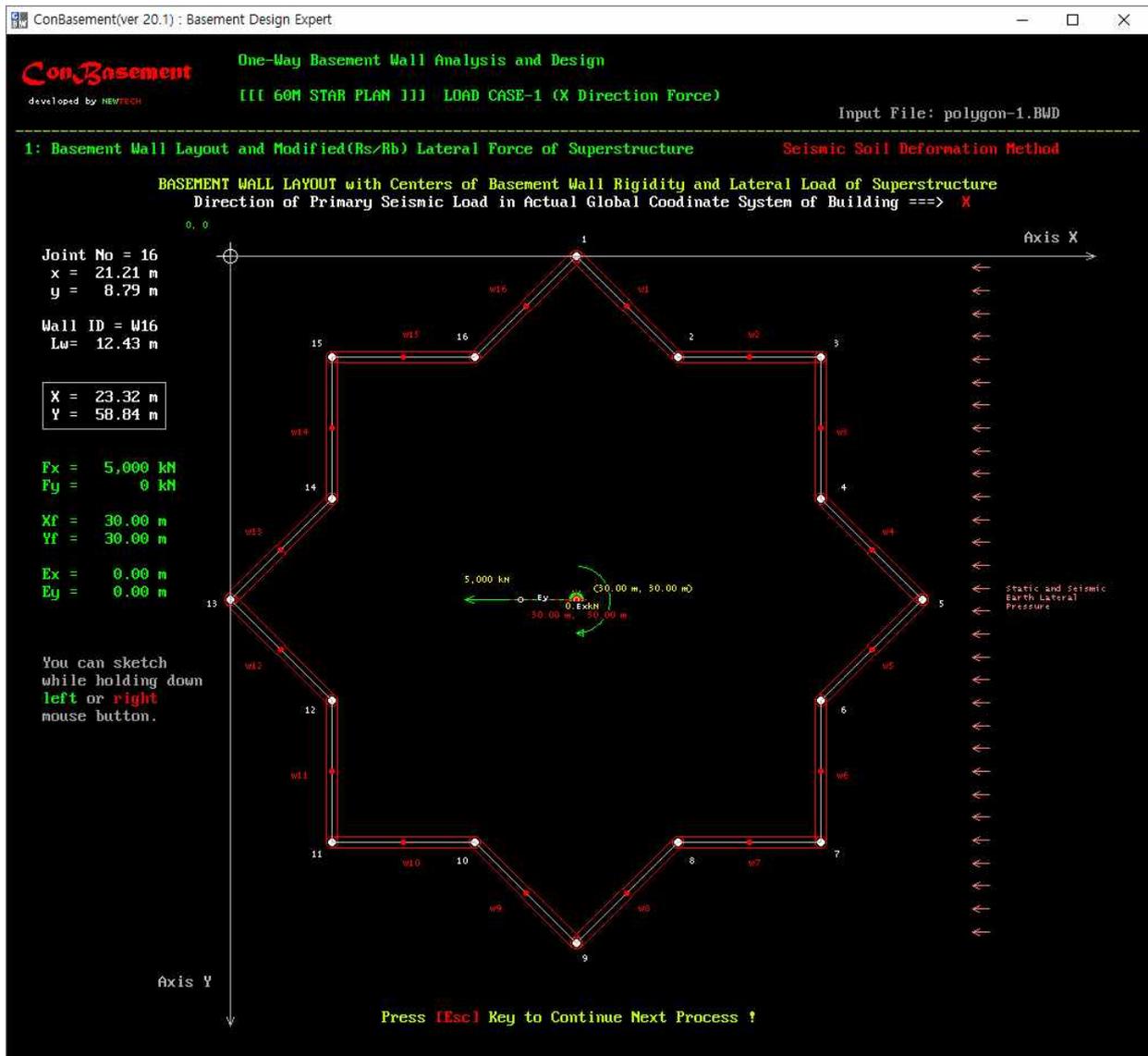


그림4-1. ConBasement의 X방향 하중에 대한 해석모델 (분할요소 총16개)



그림4-2. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

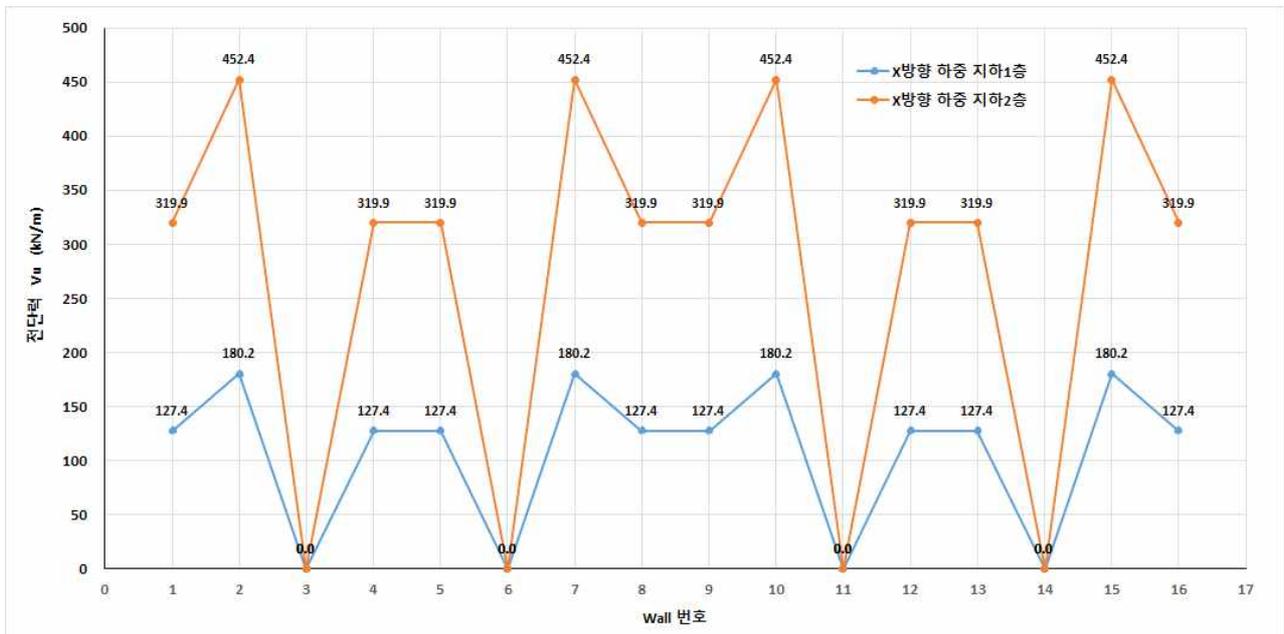


그림4-3. ConBasement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

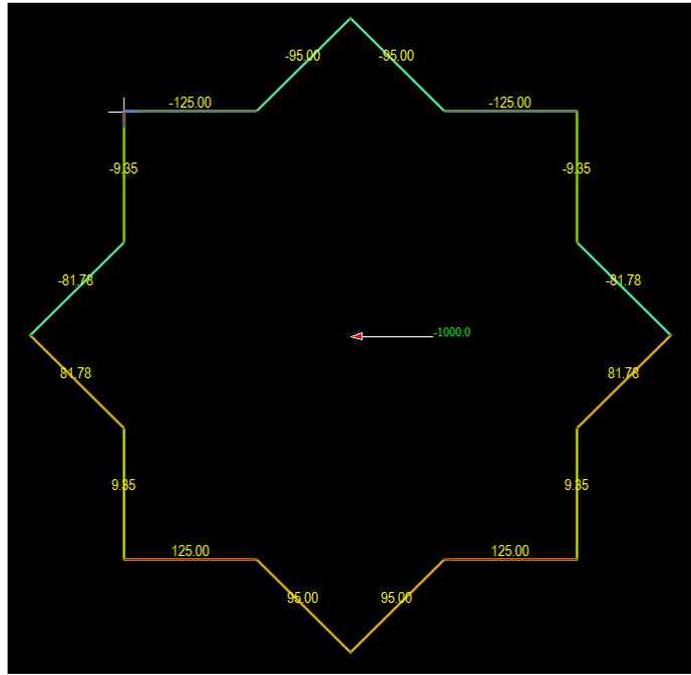


그림4-4. M사 범용 해석프로그램 (분할요소 총16개)

표4-1. 지하1층 층전단력 입력하중(kN)

ConBasement						M 해석프로그램	Theory
V1	V2	V3	V4	V5	ΣV(i)		
2816.93	1336.93	428.27	5000	8333.33	17915.46	1000	17915.46

입력 하중비 = ConBasement/M = 17915.46/1000 = 17.91546

표4-2. 지하1층 각 변의 분할 벽요소의 전단력 산출결과 비교

벽요소 부호	범용 해석프로그램(M사)				Theory	ConBasement	결과 비교		
	전단력	요소길이	단위길이당 전단력	환산값			M/Theory	Con/Theory	Con/M
	kN	m	kN/m	kN/m			비율	비율	비율
W1	95	12.42641	7.645008	136.9638	127.4309	127.432	1.0748	1.000008	0.930406
W2	125	12.42641	10.05922	180.2156	180.2146	180.216	1.0000	1.000008	1.000002
W3	9.35	12.42641	0.75243	13.48012	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W4	81.78	12.42641	6.581145	117.9042	127.4309	127.432	0.9252	1.000008	1.080809
W5	81.78	12.42641	6.581145	117.9042	127.4309	127.432	0.9252	1.000008	1.080809
W6	9.35	12.42641	0.75243	13.48012	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W7	125	12.42641	10.05922	180.2156	180.2146	180.216	1.0000	1.000008	1.000002
W8	95	12.42641	7.645008	136.9638	127.4309	127.432	1.0748	1.000008	0.930406
W9	95	12.42641	7.645008	136.9638	127.4309	127.432	1.0748	1.000008	0.930406
W10	125	12.42641	10.05922	180.2156	180.2146	180.216	1.0000	1.000008	1.000002
W11	9.35	12.42641	0.75243	13.48012	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W12	81.78	12.42641	6.581145	117.9042	127.4309	127.432	0.9252	1.000008	1.080809
W13	81.78	12.42641	6.581145	117.9042	127.4309	127.432	0.9252	1.000008	1.080809
W14	9.35	12.42641	0.75243	13.48012	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W15	125	12.42641	10.05922	180.2156	180.2146	180.216	1.0000	1.000008	1.000002
W16	95	12.42641	7.645008	136.9638	127.4309	127.432	1.0748	1.000008	0.930406

ConBasement의 해석값은 무시할 정도의 오차 0.0008%, M사 프로그램의 해석값은 최대 오차 ±7.48%가 발생하였다. 환산값 = (단위길이당 전단력) x (입력 하중비)

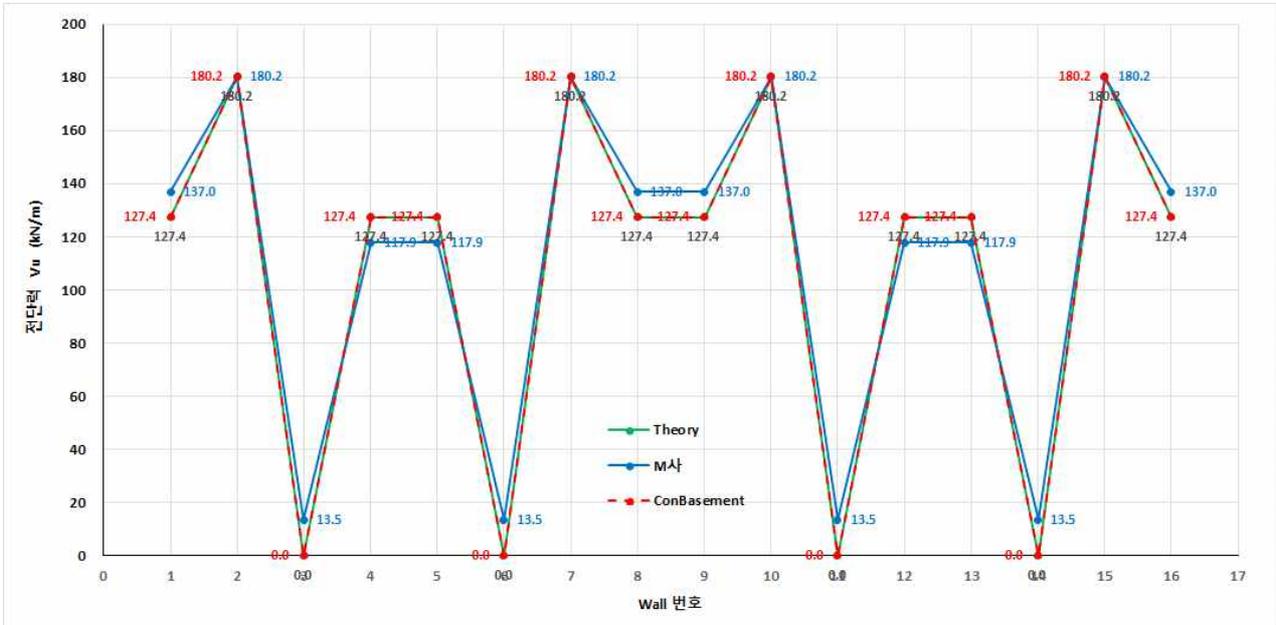


그림4-5. X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

국내에 널리 사용하고 있는 범용해석프로그램에 의한 해석결과는 일부 벽요소(W2, W7, W10, W15)를 제외한 나머지 벽요소(W1, W3, W4, W5, W6, W8, W9, W11, W12, W13, W14, W16)의 전단력은 이론적 해석결과에 비해 최대 ±7.5%의 오차를 갖고 있다. 반면에 ConBAsement에 의한 해석결과는 +0.0008%의 오차가 있으나 공학적으로 판단할 때 이론값과 동일한 것으로 볼 수 있다.

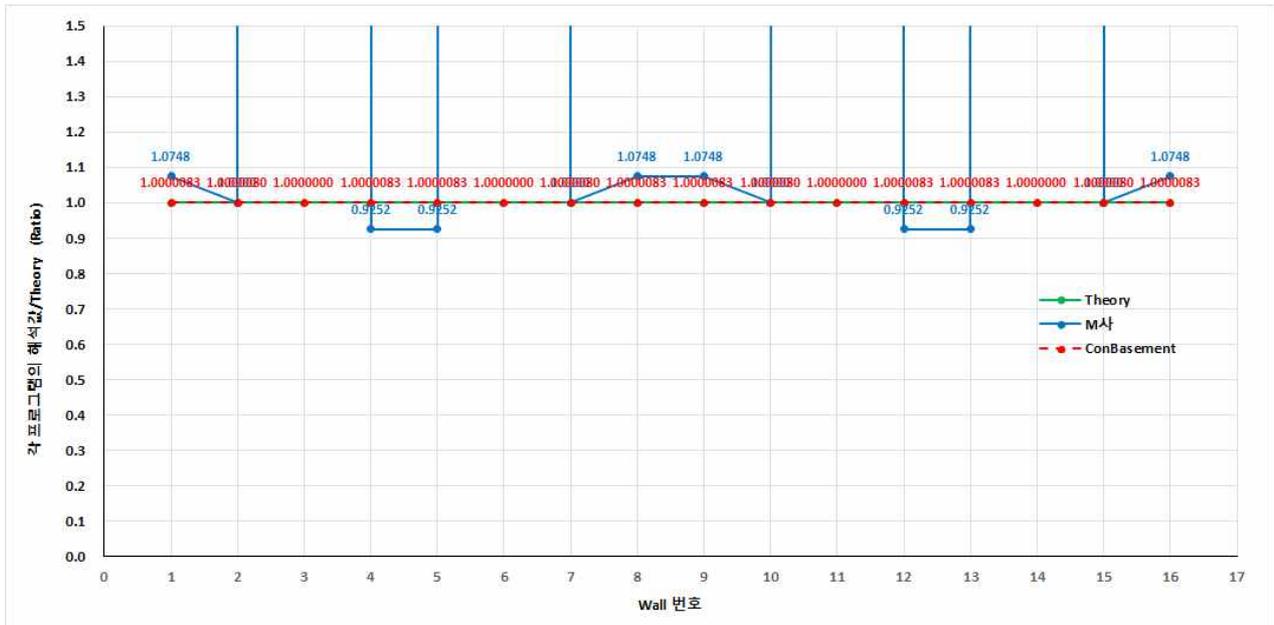


그림4-6. X방향 하중에 의한 전단력 분포 비교 (각 프로그램의 해석값/Theory값)
 위 그래프에서 수직선은 (해석값 > 0)/(Theory값 = 0)인 경우

5. 계단형상(0도 및 90도)으로 배치된 지하외벽구조의 전단력 분포

규모 및 형상

- 지상 구조물 1동
- 벽의 배치형상 : 계단식 배치, 각 변의 길이 = 10 m 또는 20 m
- 지하층 : 지하 2개 층
- 지하1층 높이 : 5.0 m
- 지하2층 높이 : 4.0 m

적용하중

- 지상구조물 관성력에 의한 밑면의 전단력과 전도모멘트 : V4, V5
- 지하구조물의 관성력 : V3
- 지하외벽에 작용하는 지진토압 : V2
- 지하외벽에 작용하는 정적토압 : V1

이 하중영향에 의한 횡력(층전단력)은 ConBasement에서 V1, V2, V3, V4, V5로 나타냄.

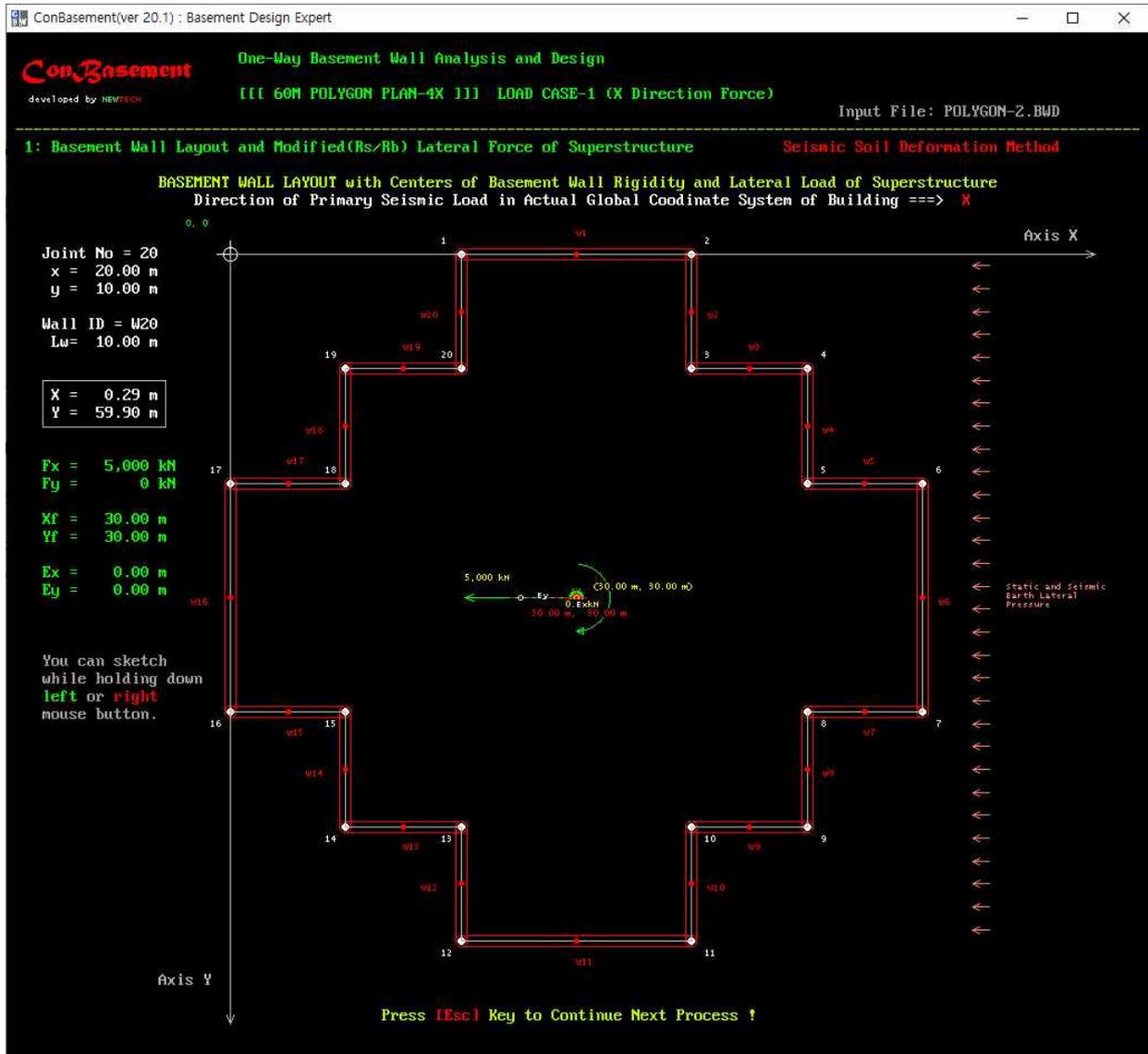


그림5-1. ConBasement의 X방향 하중에 대한 해석모델 (분할요소 총20개)

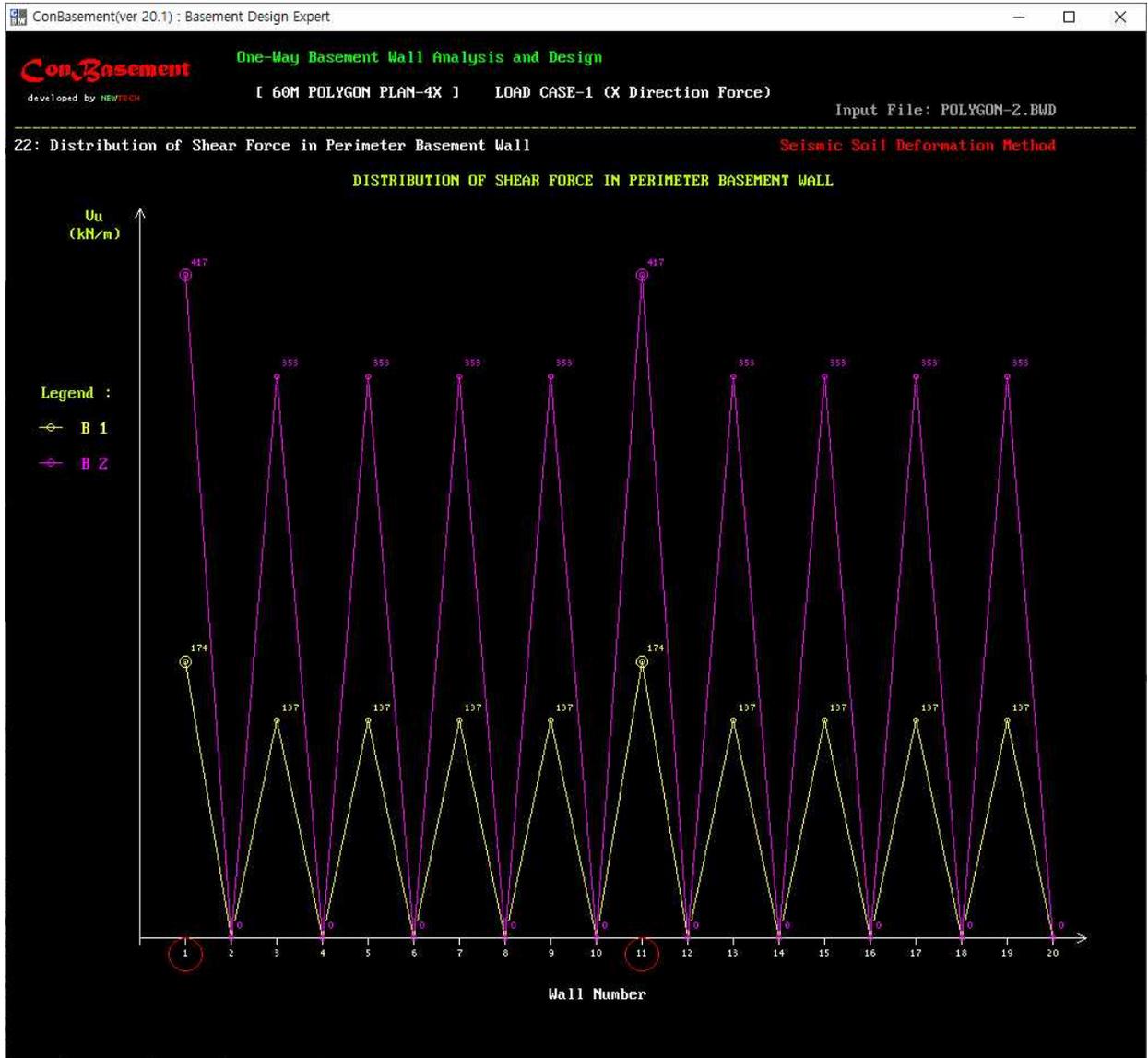


그림5-2. ConBAsement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

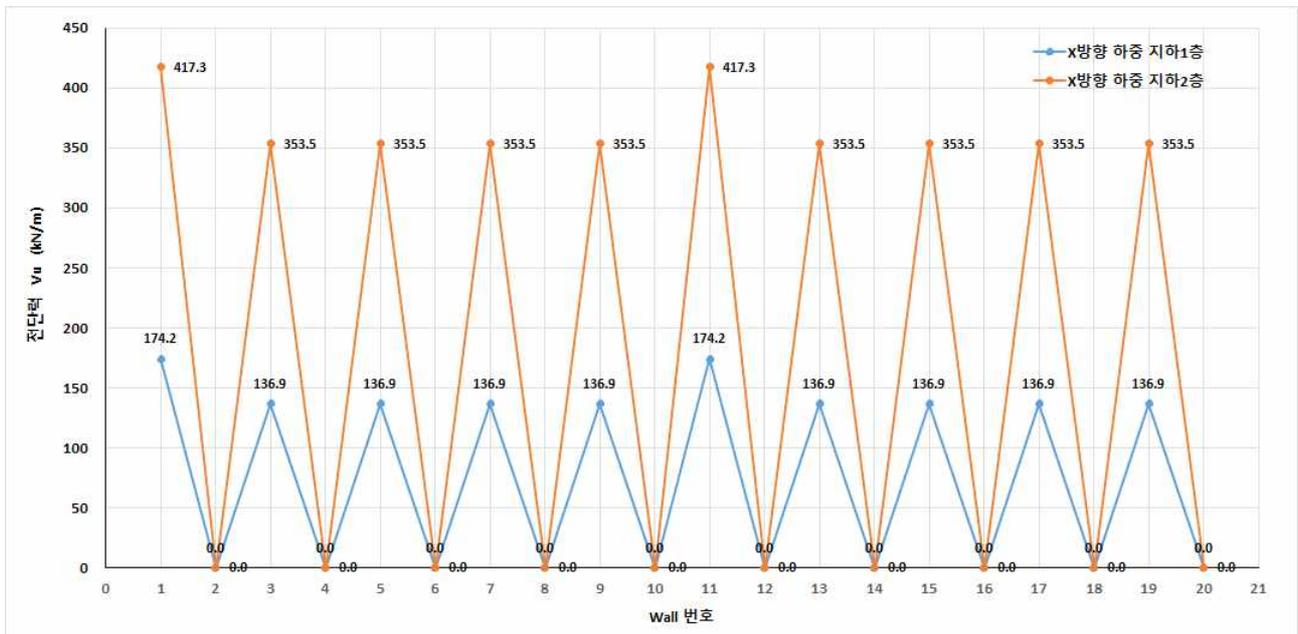


그림5-3. ConBAsement의 X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

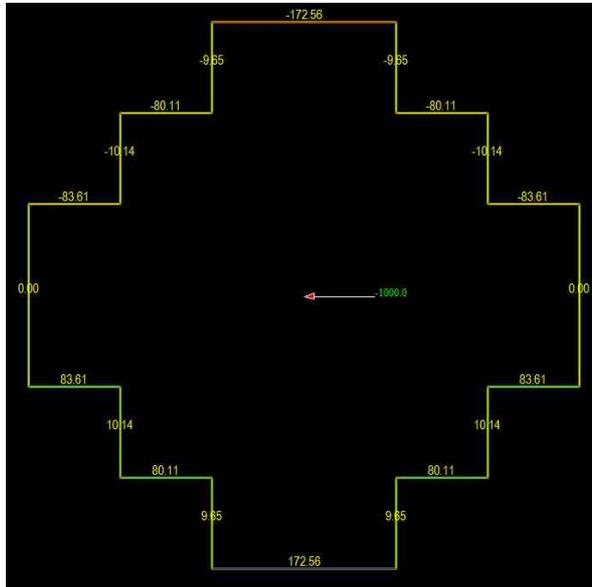


그림5-4. M사 범용 해석프로그램 (분할요소 총20개)

표5-1. 지하1층 층전단력 입력하중(kN)

ConBasement						M 해석프로그램	Theory
V1	V2	V3	V4	V5	ΣV(i)		
2816.93	1336.93	428.27	5000	8333.33	17915.46	1000	17915.46

입력 하중비 = ConBasement/M = 17915.46/1000 = 17.91546

표5-2. 지하1층 각 변의 분할 벽요소의 전단력 산출결과 비교

벽요소 부호	범용 해석프로그램(M사)				Theory	ConBasement	결과 비교		
	전단력	요소길이	단위길이당 전단력	환산값			M/Theory	Con/Theory	Con/M
	kN	m	kN/m	kN/m			비율	비율	비율
W1	172.56	20	8.628	154.57	174.177	174.178	0.887456	1.000005	1.127
W2	9.65	10	0.965	17.29	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W3	80.11	10	8.011	143.52	136.853	136.854	1.048719	1.000004	0.954
W4	10.14	10	1.014	18.17	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W5	83.61	10	8.361	149.79	136.853	136.854	1.094537	1.000004	0.914
W6	0.0	20	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
W7	83.61	10	8.361	149.79	136.853	136.854	1.094537	1.000004	0.914
W8	10.14	10	1.014	18.17	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W9	80.11	10	8.011	143.52	136.853	136.854	1.048719	1.000004	0.954
W10	9.65	10	0.965	17.29	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W11	172.56	20	8.628	154.57	174.177	174.178	0.887456	1.000005	1.127
W12	9.65	10	0.965	17.29	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W13	80.11	10	8.011	143.52	136.853	136.854	1.048719	1.000004	0.954
W14	10.14	10	1.014	18.17	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W15	83.61	10	8.361	149.79	136.853	136.854	1.094537	1.000004	0.914
W16	0.0	20	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
W17	83.61	10	8.361	149.79	136.853	136.854	1.094537	1.000004	0.914
W18	10.14	10	1.014	18.17	0.0	0.0	∞	1.0	0.0
W19	80.11	10	8.011	143.52	136.853	136.854	1.048719	1.000004	0.954
W20	9.65	10	0.965	17.29	0.0	0.0	∞	1.0	0.0

ConBasement의 해석값은 무시할 정도의 오차 +0.0005%, M사 프로그램의 해석값은 최대 오차 -11.25% ~ +9.45%가 발생하였다. 환산값 = (단위길이당 전단력) x (입력 하중비)

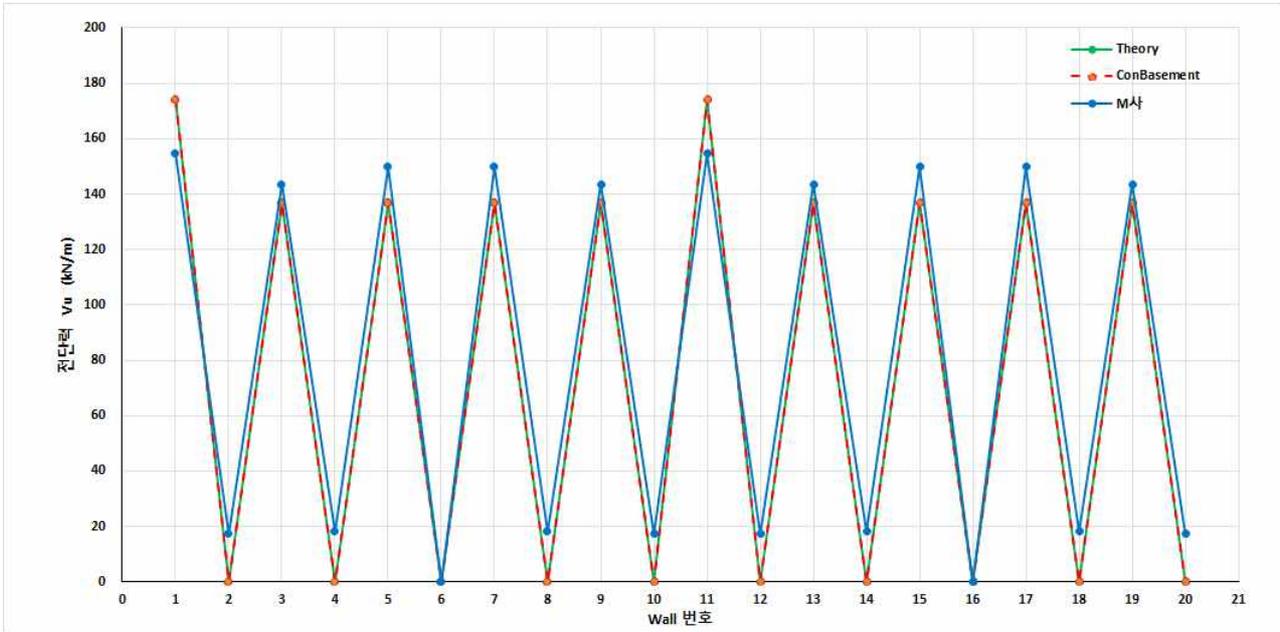


그림5-5. X방향 하중에 의한 전단력 분포 Vu(kN/m)

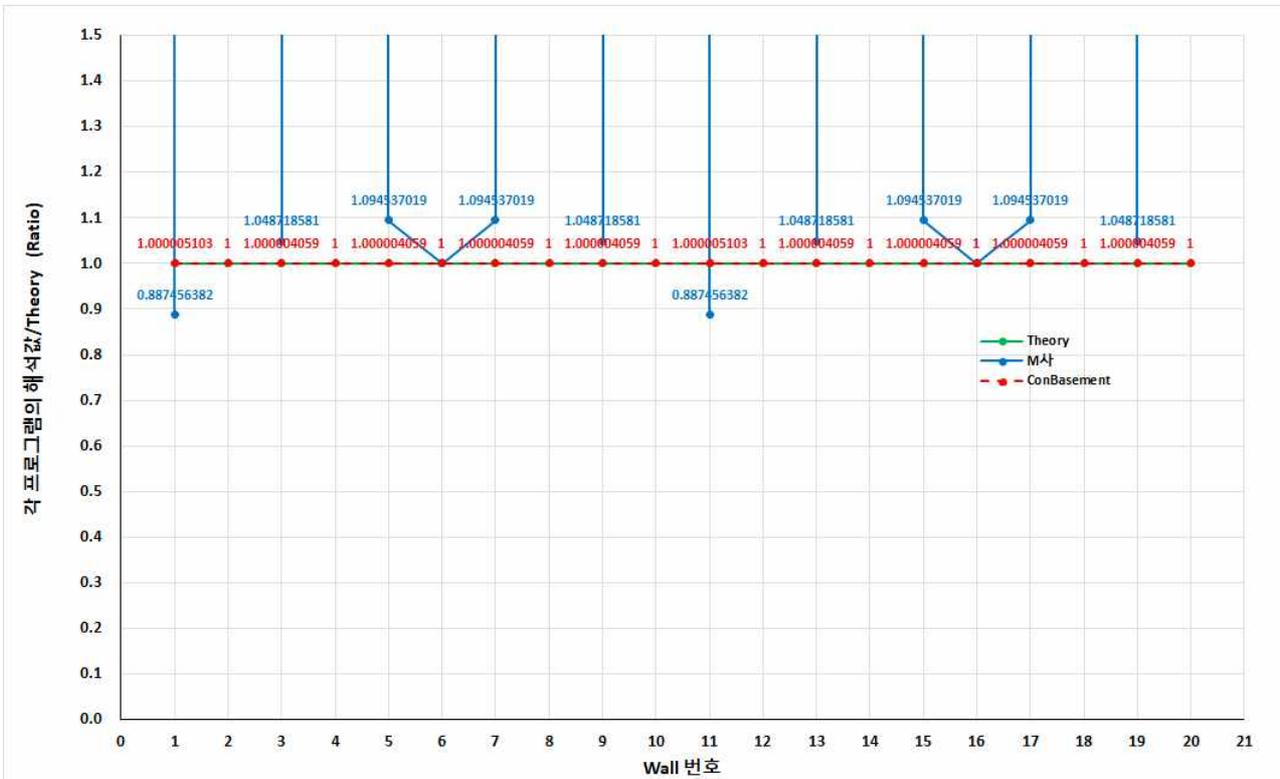


그림5-6. X방향 하중에 의한 전단력 분포 비교 (각 프로그램의 해석값/Theory값)
 위 그래프에서 수직선은 (해석값 > 0)/(Theory값 = 0)인 경우

6. 결론

앞의 검증결과들을 분석한 결과(표6-1 참조)에 의하면 ConBasement의 횡력에 대한 각 지하 외벽요소의 전단력은 이론값과 비교할 때 매우 정확하게 분배된다. 반면에 국내에 널리 사용하고 있는 범용해석프로그램은 최대 -11.25% ~ +9.45%의 오차범위를 갖고 있다(4장, 5장 참조). 이 비교분석 결과에 의하면 ConBasement의 횡력에 대한 해석방법은 타 프로그램에 비해 상대적으로 매우 높은 신뢰성을 갖고 있다고 볼 수 있다.

따라서 ConBasement는 평면상 비정형으로 배치된 지하외벽시스템에서도 신뢰성 있는 해석을 수행할 수 있다고 판단된다.

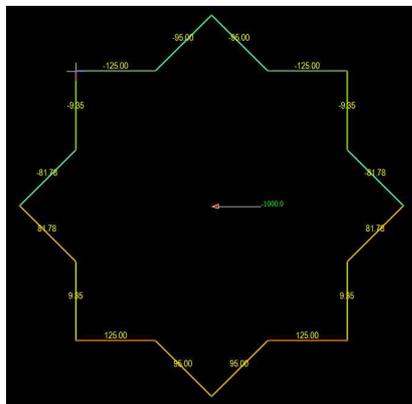
표6.1 횡력에 대한 지하외벽의 면내 전단력 분포 검증 결과

지하외벽 배치 형상		검증 기준 값 (Excel)	최대 오차 (%)	
			ConBasement	M사 범용해석프로그램
검증 1	원형	이론적 해석	+0.0038	+0.13
검증 2	정3각형	이론적 해석	±0.0	+0.10
검증 3	정8각형	이론적 해석	+0.09	+0.09
검증 4	별모양 다각형	이론적 해석	+0.0008	±7.48
검증 5	계단형(0도, 90도 배치)	이론적 해석	+0.0005	-11.25 ~ +9.45
전체 형상의 최대 오차 범위			±0.0% ~ +0.09%	-11.25% ~ +9.45%

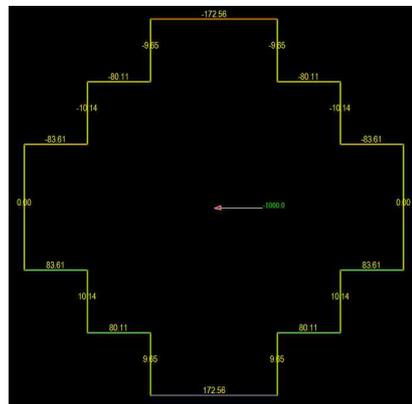
[국내 범용해석프로그램 사용 주의사항]

앞의 검증결과를 참고하면, 전단벽으로 구성된 지상구조 코어구조의 해석에 M사의 범용해석프로그램을 이용할 경우, 전단벽의 배치 형상에 따라 전단력이 정확하지 않게 산정될 수 있으므로 지상부의 전단벽 설계에도 주의할 필요가 있다. M사의 범용해석프로그램은 특히 다음 두 경우에 큰 오차가 발생하였다.

- 전단벽의 해석에 면외강성을 고려하지 않고 비틀림이 없는 경우에, 하중방향(X방향 횡력)에 직각인 벽에는 전단력이 발생하지 않아야 한다. 검증 4, 5에 편심 하중이 없는데도 불구하고 전단력이 분포되었다.
- 전단벽의 해석에 면외강성을 고려하지 않고 비틀림이 없는 경우에, 전단벽의 강성과 하중방향에 대한 전단벽의 각도가 동일한 전단벽들은 전단력 크기가 서로 동일하게 분포되어야 한다. 검증 4, 5에 편심 하중이 없는데도 불구하고 동일한 조건을 가진 전단벽의 전단력 크기가 서로 다르게 분포되었다.



검증 4 참조



검증 5 참조

[부록-1] 전단벽의 횡력 분배를 위한 이론적 해석방법에 사용한 식

- 전단벽의 면내하중에 대한 변형

$$\Delta_{F(i)} = \frac{h_{(i)}^3}{3E_c I_{(i)}}$$

$$\Delta_{S(i)} = \frac{h_{(i)}}{G_c A_{(i)}} = \frac{h_{(i)}}{0.4E_c A_{(i)}}$$

$$\Delta_{total(i)} = \Delta_{F(i)} + \Delta_{S(i)}$$

- 전단벽의 면내 횡강성

$$k_{(i)} = \frac{1}{\Delta_{total(i)}} = \frac{1}{\Delta_{F(i)} + \Delta_{S(i)}}$$

- 전단벽 그룹의 강성 중심

$$\bar{x}_r = \frac{\sum k_{(i)y} x_i}{\sum k_{(i)y}}$$

$$\bar{y}_r = \frac{\sum k_{(i)x} y_i}{\sum k_{(i)x}}$$

- X방향으로 작용하는 층 전단력에 대한 각 벽의 전단력

$$V_{(i)x} = V_x \frac{k_{(i)x}}{\sum k_{(i)x}} + V_x e_y \frac{k_{(i)x} y_{(i)}}{J_r}$$

- Y방향으로 작용하는 층 전단력에 대한 각 벽의 전단력

$$V_{(i)y} = V_y \frac{k_{(i)y}}{\sum k_{(i)y}} + V_y e_x \frac{k_{(i)y} x_{(i)}}{J_r}$$

- 전단벽 그룹의 비틀림 강성

$$J_r = \sum k_{(i)y} x_i^2 + \sum k_{(i)x} y_i^2 \Rightarrow J_r = \sum k_{(i)} r_{t(i)}^2$$

여기서,

i = 각 전단벽 요소의 번호

$h_{(i)}$ = 각 전단벽 높이

E_c = 콘크리트 탄성계수

$A_{(i)}$ = 각 전단벽의 단면적

$I_{(i)}$ = 각 전단벽의 단면2차모멘트

$x_{(i)}$ = 각 전단벽요소 중심에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 x방향 직각 거리

$y_{(i)}$ = 각 전단벽요소 중심에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 y방향 직각 거리

$r_{t(i)}$ = 각 전단벽요소 중심의 접선에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 직각 거리

e_x = Y방향 층 전단력의 중심에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 x방향 직각 거리

e_y = X방향 층 전단력의 중심에서 전단벽 그룹의 강성 중심까지 y방향 직각 거리

$k_{(i)x}$ = X방향 층 전단력과 해당 전단벽요소 사이의 각도를 고려한 각 요소의 횡강성

$k_{(i)y}$ = Y방향 층 전단력과 해당 전단벽요소 사이의 각도를 고려한 각 요소의 횡강성

$k_{(i)}$ = 해당 전단벽요소의 각도를 고려하지 않은 각 요소의 벽 길이방향 횡강성

V_x = X방향 층 전단력

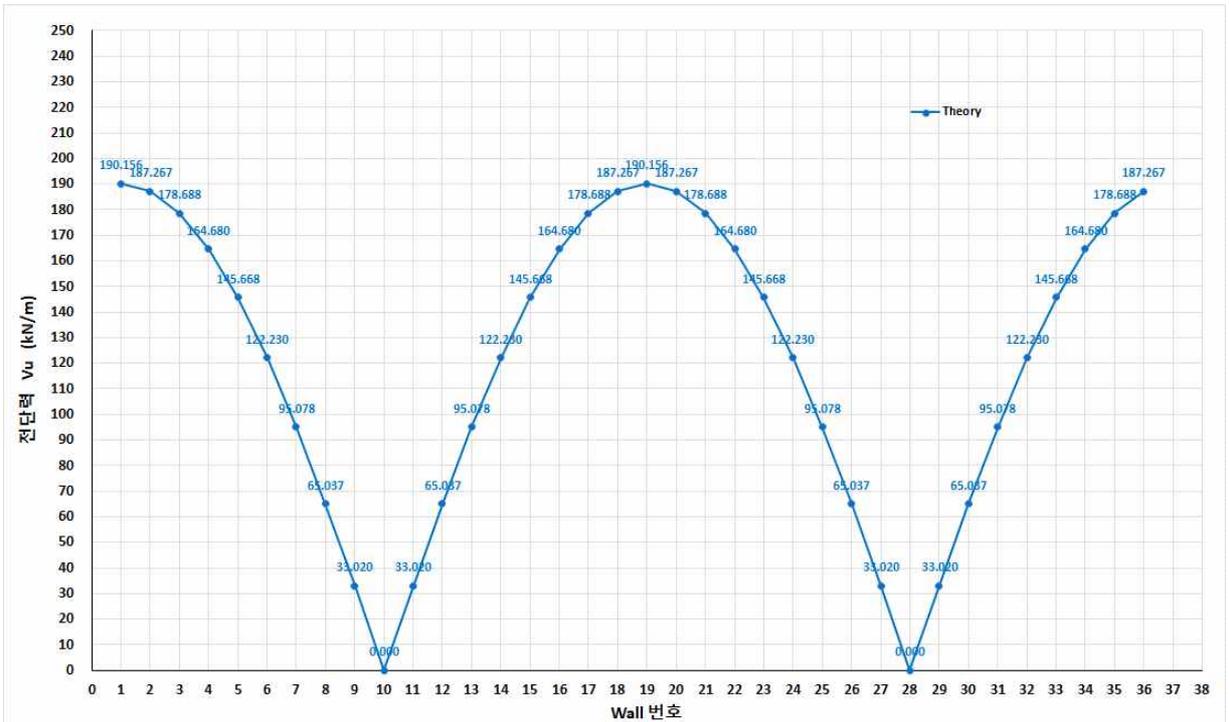
V_y = Y방향 층 전단력

[부록-2] Excel에 의한 이론적 해석 예

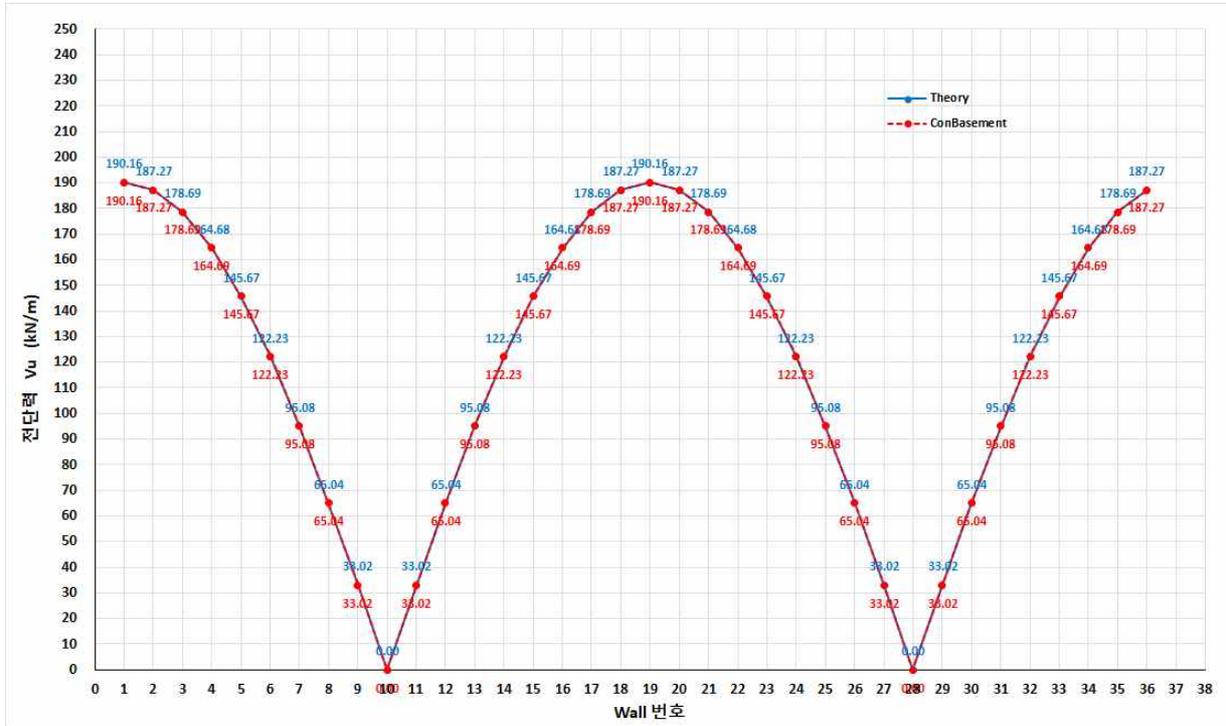
단순화를 위해 지하 1층, 2층 중에서 지하 1층에 대한 그래프만 포함시켰다.

표A2-1. 원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 이론적 해석

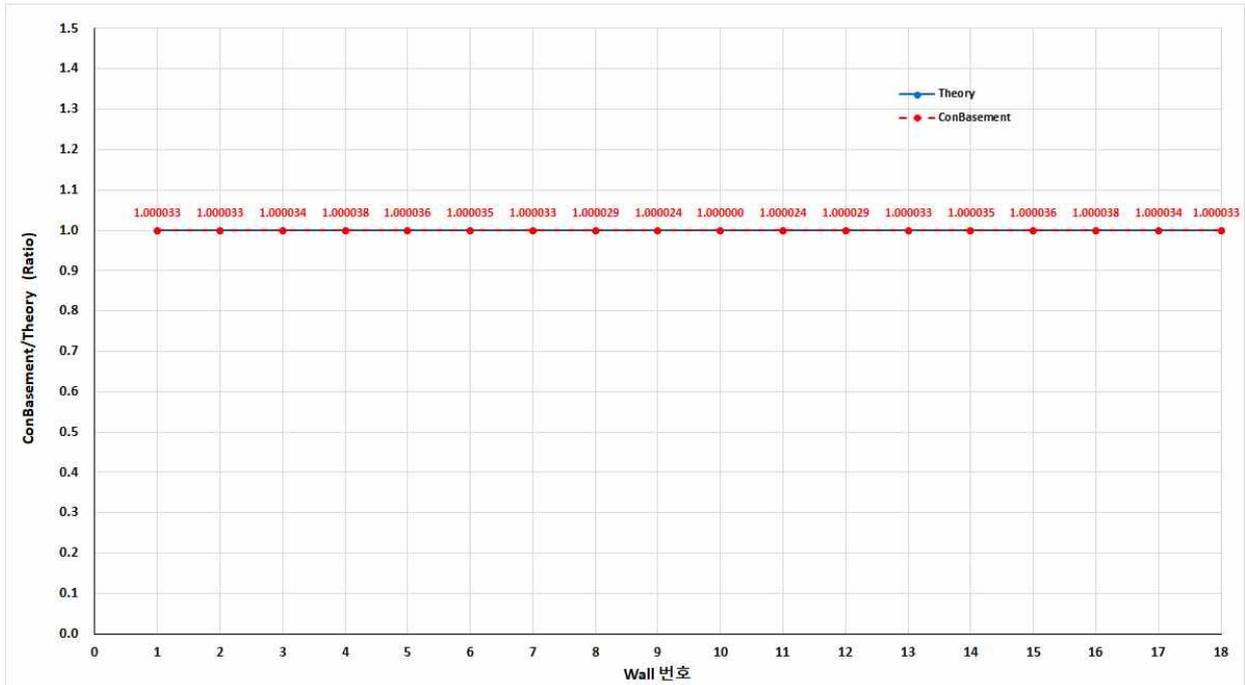
R	30	m											각도고려		각도고려		Theory	
V	17899	kN											조합 R		평력분배계수		각 벽의 전단력	
Ec	1	MPa											C		E		F	
h	5	m											D		V*E		G	
Δ	1	mm											C*Cos(θ)^2					
			X방향 횡력시		Y방향 횡력시				전단강성		휨강성							
wall no	Thick	Lw	θ	cos	sin	A	I	h/(GA)	A	B	C	D	E	F	G			
	m	m	Degree	Radian	Radian	m ²	m ⁴	1	h ³ /(3EI)	h ³ /(3EI)	Δ/(A+B)	Δ/(A+B)		V*E	F/Lw	(kN/m)		
1	0.4	5.22934	0	1	0	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0679	0.0556	0.0556	994.389	190.156	190.156		
2	0.4	5.22934	10	0.984807753	0.173648178	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0659	0.0547	0.0547	979.282	187.267	187.267		
3	0.4	5.22934	20	0.939692621	0.342020143	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0600	0.0522	0.0522	934.420	178.688	178.688		
4	0.4	5.22934	30	0.866025404	0.5	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0510	0.0481	0.0481	861.166	164.680	164.680		
5	0.4	5.22934	40	0.766044443	0.64278761	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0399	0.0426	0.0426	761.746	145.668	145.668		
6	0.4	5.22934	50	0.64278761	0.766044443	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0281	0.0357	0.0357	639.181	122.230	122.230		
7	0.4	5.22934	60	0.5	0.866025404	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0170	0.0278	0.0278	497.194	95.078	95.078		
8	0.4	5.22934	70	0.342020143	0.939692621	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0079	0.0190	0.0190	340.101	65.037	65.037		
9	0.4	5.22934	80	0.173648178	0.984807753	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0020	0.0096	0.0096	172.674	33.020	33.020		
10	0.4	5.22934	90	6.12574E-17	1	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000		
11	0.4	5.22934	100	-0.173648178	0.984807753	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0020	0.0096	0.0096	172.674	33.020	33.020		
12	0.4	5.22934	110	-0.342020143	0.939692621	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0079	0.0190	0.0190	340.101	65.037	65.037		
13	0.4	5.22934	120	-0.5	0.866025404	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0170	0.0278	0.0278	497.194	95.078	95.078		
14	0.4	5.22934	130	-0.64278761	0.766044443	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0281	0.0357	0.0357	639.181	122.230	122.230		
15	0.4	5.22934	140	-0.766044443	0.64278761	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0399	0.0426	0.0426	761.746	145.668	145.668		
16	0.4	5.22934	150	-0.866025404	0.5	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0510	0.0481	0.0481	861.166	164.680	164.680		
17	0.4	5.22934	160	-0.939692621	0.342020143	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0600	0.0522	0.0522	934.420	178.688	178.688		
18	0.4	5.22934	170	-0.984807753	0.173648178	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0659	0.0547	0.0547	979.282	187.267	187.267		
19	0.4	5.22934	180	-1	1.22515E-16	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0679	0.0556	0.0556	994.389	190.156	190.156		
20	0.4	5.22934	190	-0.984807753	-0.173648178	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0659	0.0547	0.0547	979.282	187.267	187.267		
21	0.4	5.22934	200	-0.939692621	-0.342020143	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0600	0.0522	0.0522	934.420	178.688	178.688		
22	0.4	5.22934	210	-0.866025404	-0.5	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0510	0.0481	0.0481	861.166	164.680	164.680		
23	0.4	5.22934	220	-0.766044443	-0.64278761	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0399	0.0426	0.0426	761.746	145.668	145.668		
24	0.4	5.22934	230	-0.64278761	-0.766044443	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0281	0.0357	0.0357	639.181	122.230	122.230		
25	0.4	5.22934	240	-0.5	-0.866025404	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0170	0.0278	0.0278	497.194	95.078	95.078		
26	0.4	5.22934	250	-0.342020143	-0.939692621	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0079	0.0190	0.0190	340.101	65.037	65.037		
27	0.4	5.22934	260	-0.173648178	-0.984807753	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0020	0.0096	0.0096	172.674	33.020	33.020		
28	0.4	5.22934	270	-1.83772E-16	-1	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000		
29	0.4	5.22934	280	0.173648178	-0.984807753	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0020	0.0096	0.0096	172.674	33.020	33.020		
30	0.4	5.22934	290	0.342020143	-0.939692621	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0079	0.0190	0.0190	340.101	65.037	65.037		
31	0.4	5.22934	300	0.5	-0.866025404	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0170	0.0278	0.0278	497.194	95.078	95.078		
32	0.4	5.22934	310	0.64278761	-0.766044443	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0281	0.0357	0.0357	639.181	122.230	122.230		
33	0.4	5.22934	320	0.766044443	-0.64278761	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0399	0.0426	0.0426	761.746	145.668	145.668		
34	0.4	5.22934	330	0.866025404	-0.5	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0510	0.0481	0.0481	861.166	164.680	164.680		
35	0.4	5.22934	340	0.939692621	-0.342020143	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0600	0.0522	0.0522	934.420	178.688	178.688		
36	0.4	5.22934	350	0.984807753	-0.173648178	2.091736	4.766717	5.975898	8.741166	0.067948	0.0659	0.0547	0.0547	979.282	187.267	187.267		



그림A2-1. 원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 이론적 해석



그림A2-2. 원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석 이론값과 ConBasement의 해석값 비교

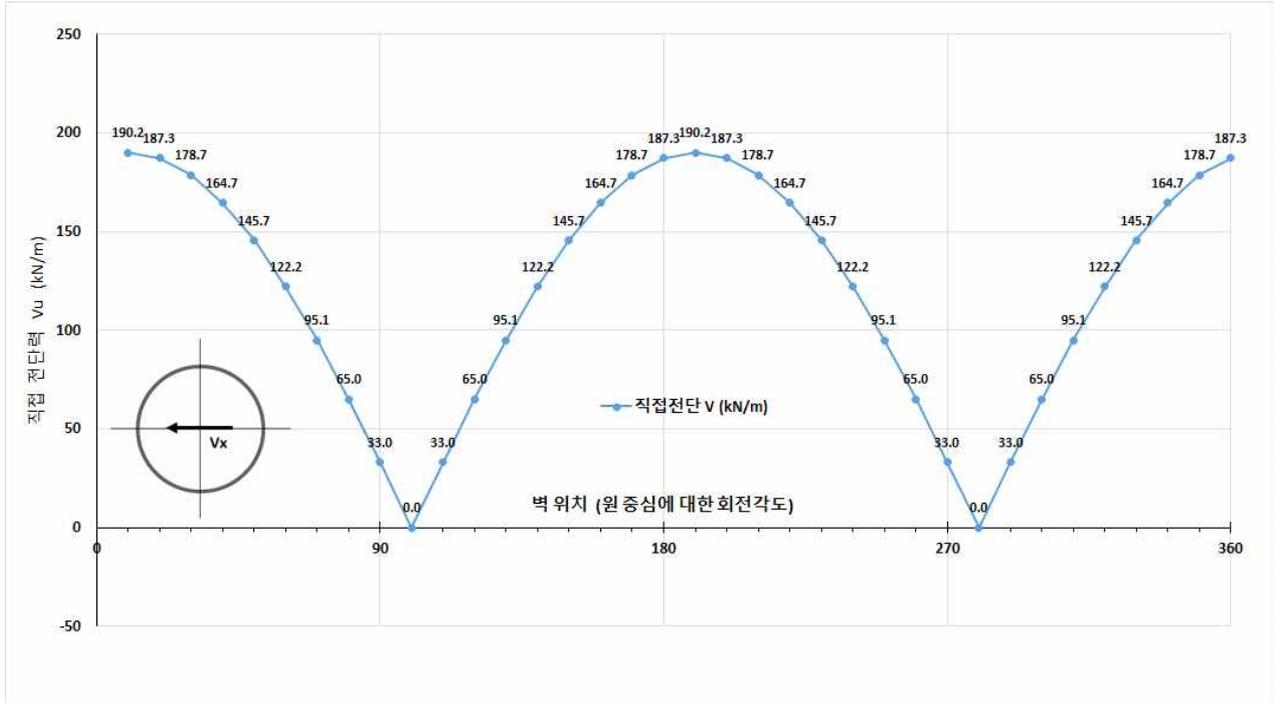


그림A2-3. 원형 배치 지하외벽(18개 요소/36개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석 이론값과 ConBasement의 해석값 비교 (ConBasement값/Theory값)

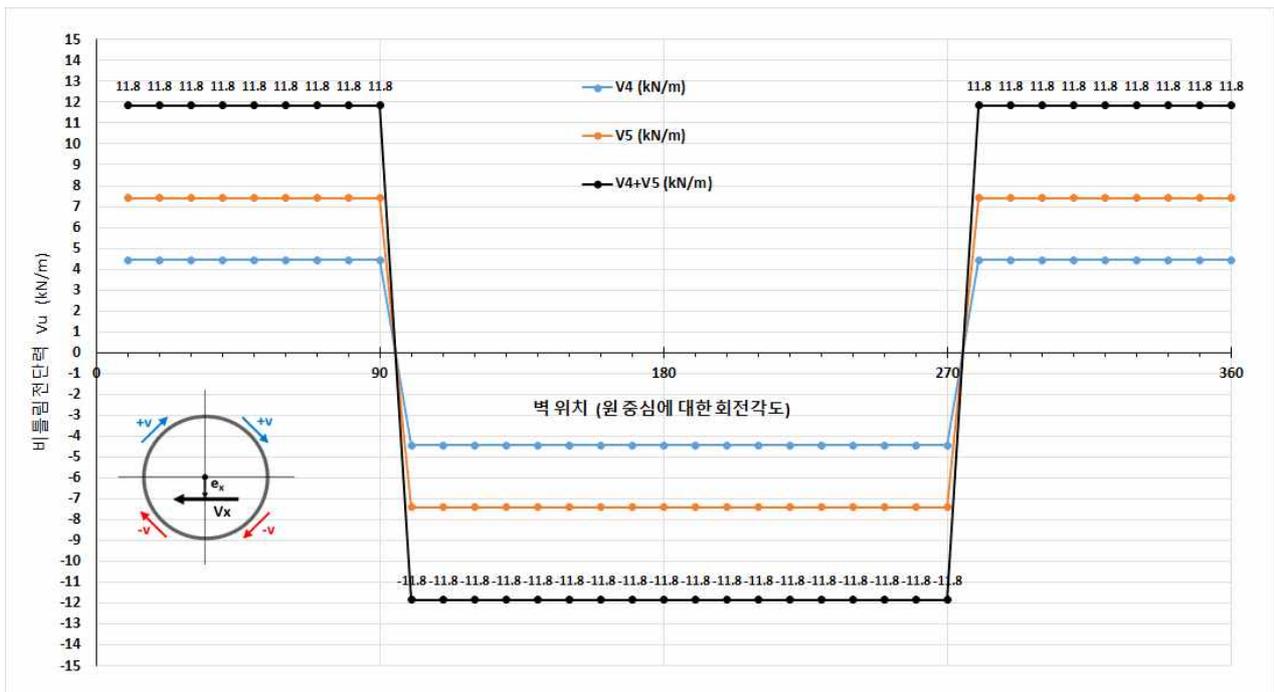
* 숫자가 겹치지 않도록 36개 요소 중 절반 18개 요소만 나타냄

[부록-3] 이론적 해석방법을 적용한 ConBasement 해석 예
 원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심(5m)이 있는 X방향 층전단력에 대한 해석 예

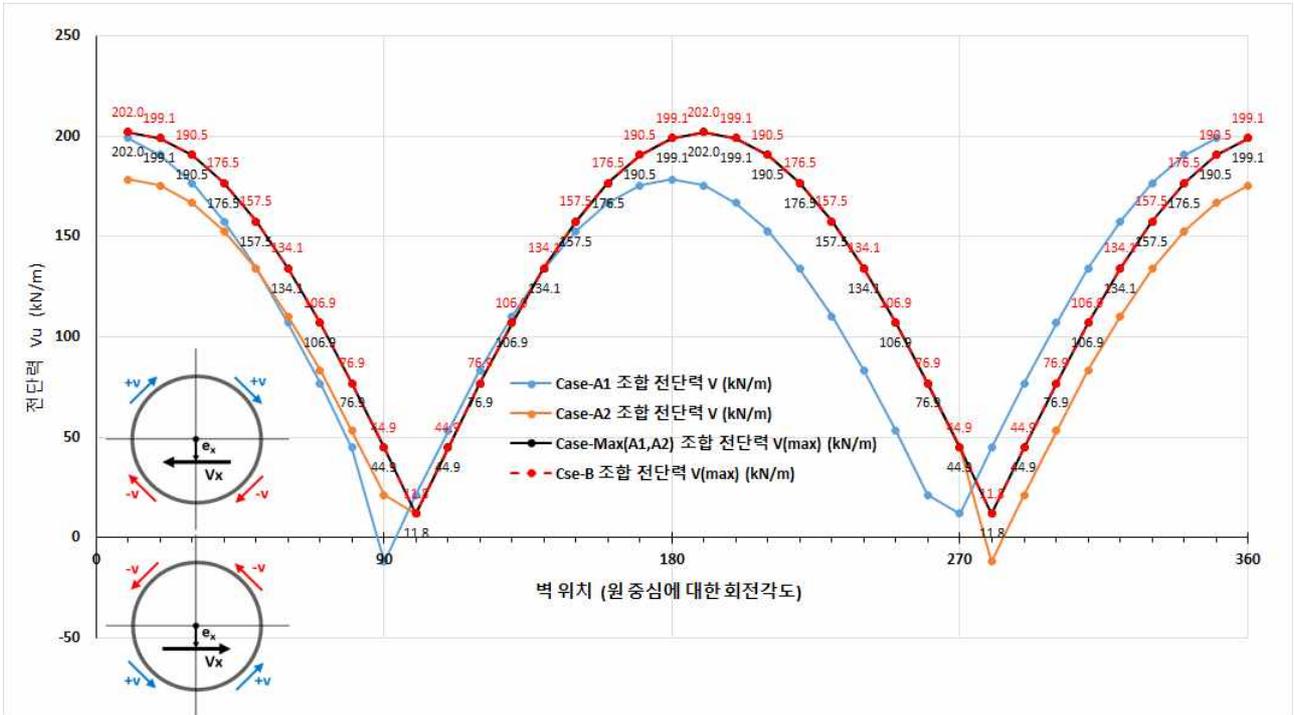
다음과 같이 ConBasement의 해석과정을 그래프로 나타내었다. 그래프는 해석과정에서 출력된 값들을 이용하여 Excel로 작성하였다. 단순화를 위해 지하 1층, 2층 중에서 지하 1층에 대한 그래프만 포함시켰다.



그림A3-1. 원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심(5m)이 있는 X방향 층전단력에 대한 해석
 ConBasement의 해석과정에 포함된 순 직접 전단력

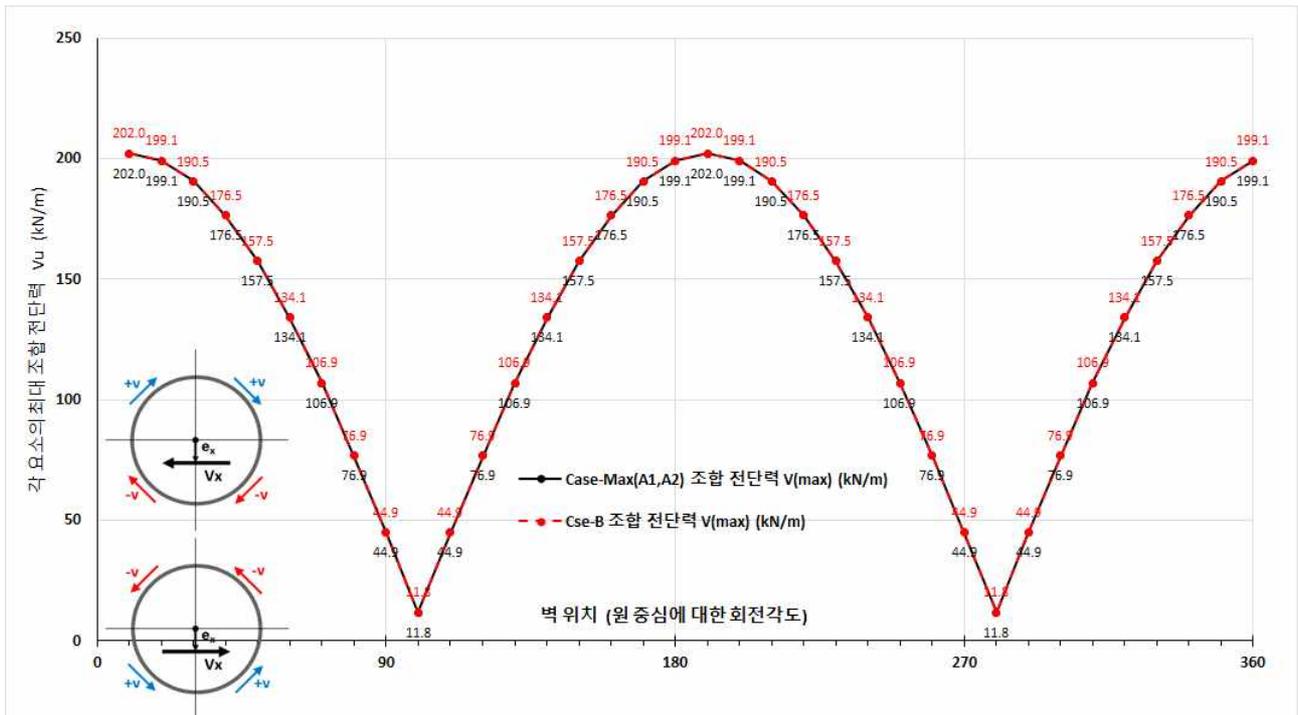


그림A3-2. 원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심(5m)이 있는 X방향 층전단력에 대한 해석
 ConBasement의 해석과정에 포함된 순 비틀림 전단력



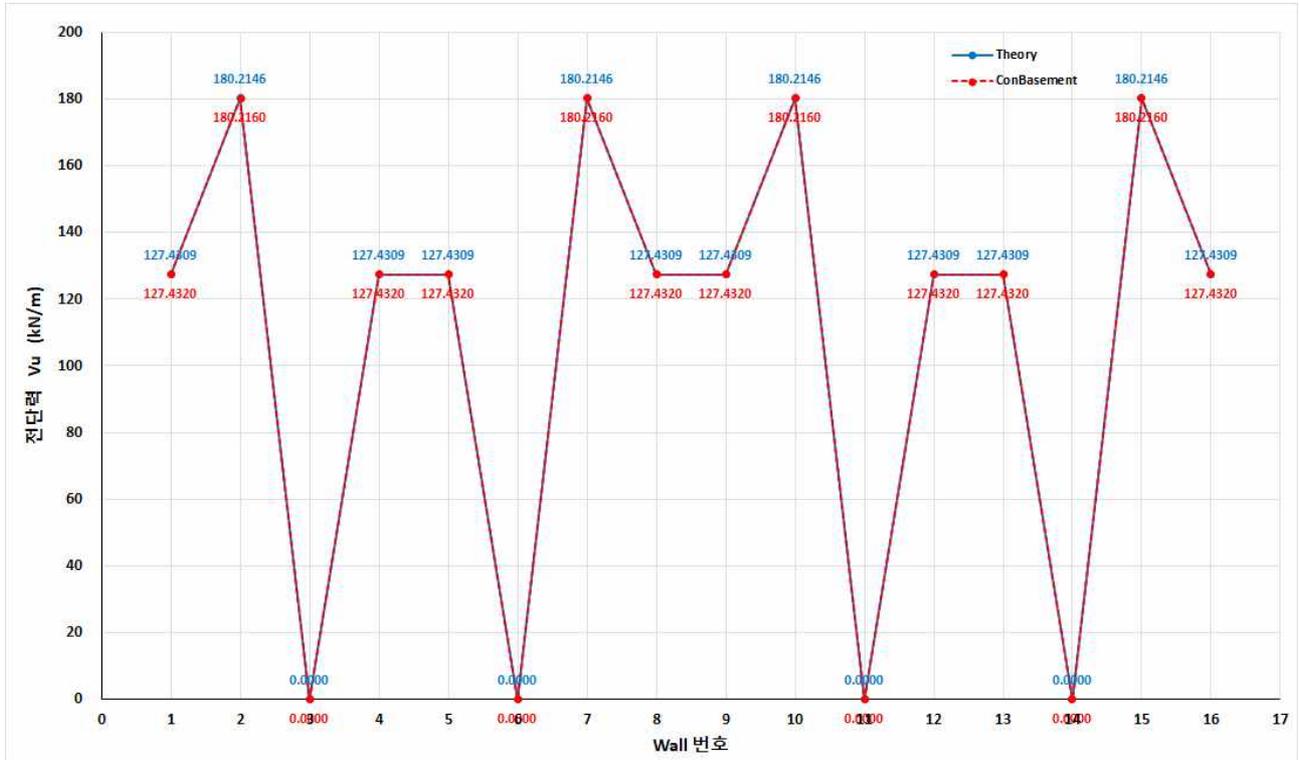
그림A3-3. 원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심(5m)이 있는 X방향 층전단력에 대한 해석 ConBasement의 해석과정에 포함된 각 Case별 전단력

위 그래프(그림A3-3)는 직접 전단력(그림A3-1)에 비틀림 전단력(그림A3-2)을 합하는 과정과 각 요소의 최대 전단력을 결정하는 과정을 나타낸다.

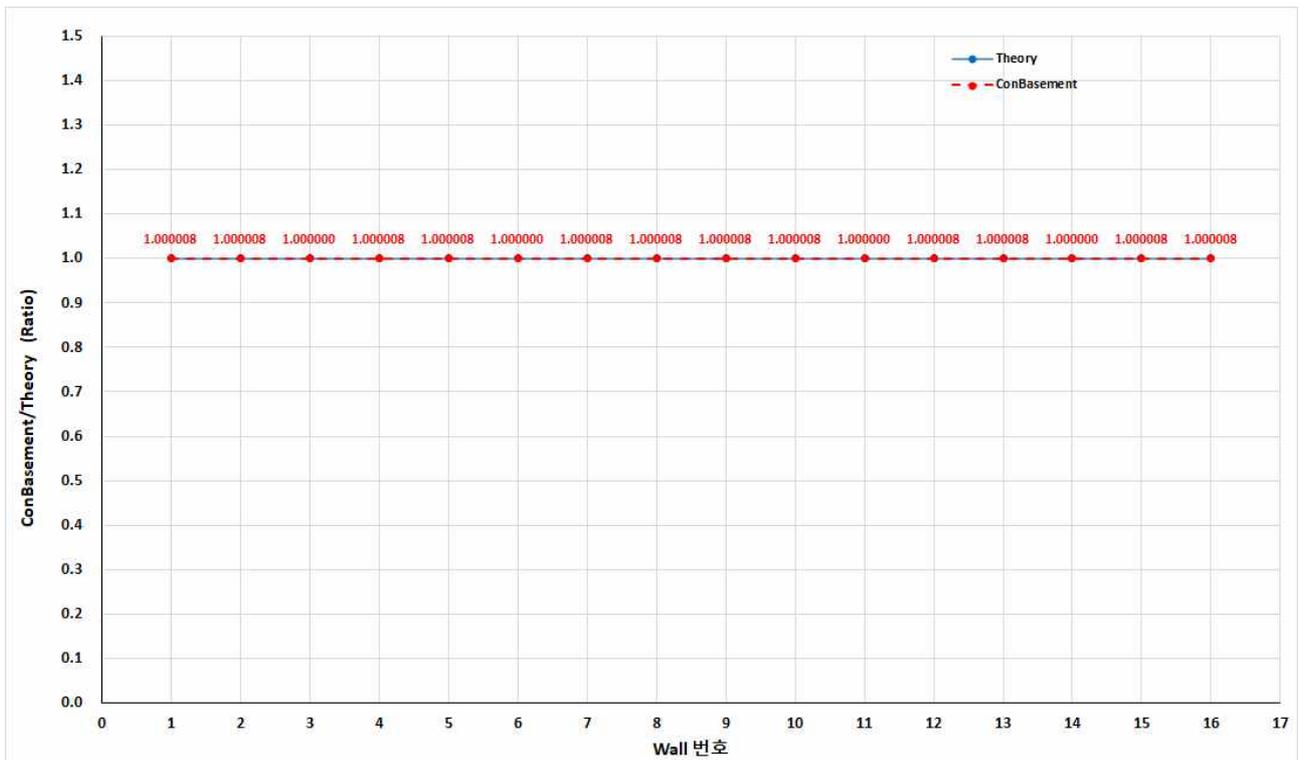


그림A3-4 원형 배치 지하외벽(36개 요소), 편심(5m)이 있는 X방향 층전단력에 대한 해석 ConBasement의 최종 해석결과인 각 요소의 최대 조합 전단력

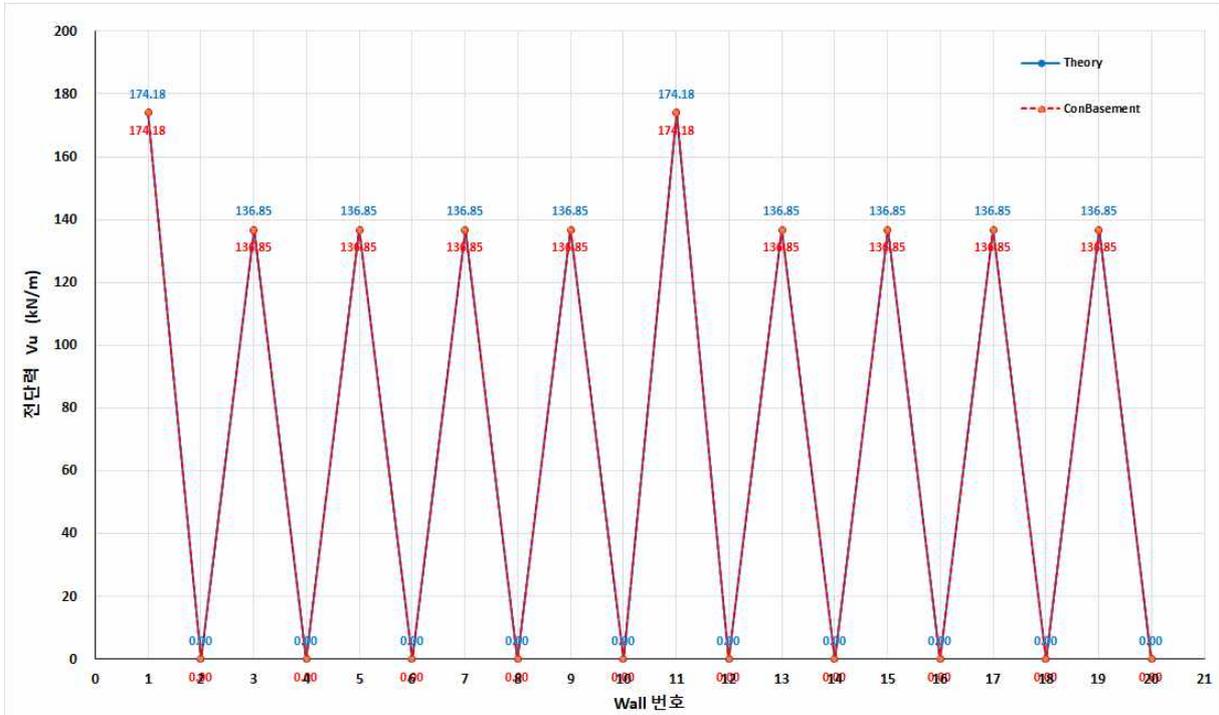
이 부록 3의 예는 1층에 작용하는 지상충구조물의 밑면 전단력과 전도모멘트만 편심 횡력(각 그래프의 그림에서 원형 배치 전단벽에 있는 화살표)으로 작용하고 이외의 횡력들은 강성 중심에 작용한다.



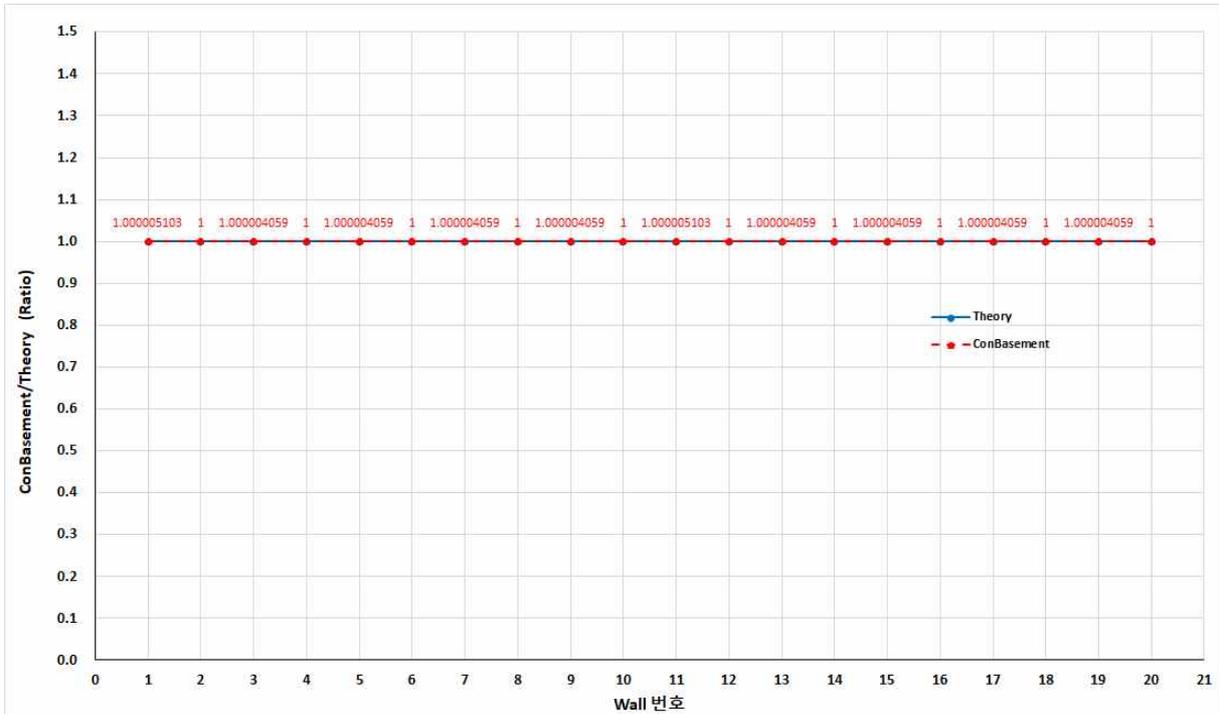
그림A4-2. 별모양 배치 지하외벽(16개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석 이론값과 ConBAsement의 해석값 비교



그림A4-2. 별모양 배치 지하외벽(16개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석 이론값과 ConBAsement의 해석값 비교 (ConBAsement값/Theory값)



그림A5-2. 계단식 배치 지하외벽(20개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석 이론값과 ConBasement의 해석값 비교



그림A5-2. 계단식 배치 지하외벽(20개 요소), 편심이 없는 X방향 층전단력에 대한 해석 이론값과 ConBasement의 해석값 비교 (ConBasement값/Theory값)