

〈논 문〉 SAE NO. 953708

경계 요소법과 평면파 이론을 이용한 흡기계 해석

An Analysis of Intake System using BEM and 1-D Solution

이 장 명,* 권 오 상**
C. M. Lee, O. S. Kwon

ABSTRACT

The application of the 4-pole parameter method with 1-D theory is acceptable for intake system analysis. However, the limitaion appears during the analysis of complicated intake system since this method is developed based on the plane wave thoery. For the intake system analysis, the usage of BEM(Boundary Element Method) is introduced describing its disadvantage. To combine benefits of both method, a hybrid method is introduced. This hybrid method consists of the 4-pole parameter with 1-D theory and BEM. The developed method is applied to an automobile intake system analysis to obtain the transmission loss.

주요기술용어 : 4-Pole Parameter Method(4단자 수정법), Boundary Element Method(경계 요소법), Higher Order Mode(고차 모드), Transmission Loss(투과 손실), Insertion Loss(삽입 손실)

1. 서 론

자동차 실내 소음에 영향을 미치는 것으로서 여러 인자들이 존재하는데, 그 중 가장 큰 인자는 엔진과 관련된 소음원이다. 이러한 엔진에 기인하는 소음원 또한 여러가지로 분류가 가능하나, 이 중에서도 엔진 흡입력 및 폭발 소음에 의한 흡기계의 소음은 점점 중요한 소음원이 되고 있다.

이러한 흡기 소음을 줄이기 위해서는, 흡기계에 대한 소음 성능 해석이 필요하며, 이에 사용될 수 있는 방법에는 여러가지가 있다. 우선 전체의

흡기계를 대상으로 하는 이론해(analytic solution)를 고려할 수 있는데, 음파 전달 매질인 공기가 여러 가지 효과, 예를 들면 평균 유속이라든가, 열-점성 손실, 선형 온도 구배등의 문제를 고려할 수 있으며, 덕트 단면의 급격한 변화에 의해 발생하는 Evanescent Mode의 효과를 표현할 수 있는 장점이 있으나, 이러한 해는 단순 형상에 대해서 얻어진 것이므로, 형상이 복잡할 때의 효과를 표현할 수 없고, 또한 전체 흡기계를 표현하는 방정식을 실제로 구성한다는 것은 굉장히 시간이 많이 걸리므로 이 방법은 채택하기 곤란하다.

* 정회원, 울산대학교 자동차공학과

** 기아자동차 NVH팀

위 방법의 대안으로 제시될 수 있는 것이 평면파 이론에 의한 4단자 정수법(4-pole parameter method)이다. 4단자 정수법은 전체의 시스템을 구간 별로 나누어 단순화시키고, 각 부분에 대한 이론해를 서로 연결시켜서 전체의 해를 구하는 방법인데, 위의 방법과 비교해 볼 때, 전체를 해석하는 데에 걸리는 시간이 굉장히 적으며, 위와 마찬가지로 평균 유속과 열-점성 손실등의 효과를 표현할 수 있고, 전체 시스템의 구성을 변경시키는 것이 매우 용이하다는 장점을 가지나, 흔히 각 요소들의 4단자 정수가 그 요소 내부에 평면파만이 존재한다는 가정하에 유도되었기 때문에 그 사용 범위가 저주파대로 한정된다는 약점이 있다. 아울러, 단면 확장부와 단면 축소부 사이의 거리가 짧은 경우, 그 단면 방향의 고차 모드의 차단 주파수 이하일지라도 고차 모드들이 충분히 감소되지 않아 그 내부를 평면파로만 모델링하는 것은 많은 문제를 가지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, Ih & Lee, Yi & Lee 등은 원통형 확장관에서의 4단자 정수를 그 원통 내부의 고차 모드까지 고려하여 구함으로써 이 문제를 해결하였으나¹⁻³⁾, 확장관의 형상이 달라지면 적용할 수 없는 문제가 있으며, 또한 내부의 고차 모드를 고려하여 모델링하더라도, 연결 부위에서의 음압(sound pressure)과 체적 속도(volume velocity)의 공간상의 분포를 무시하고 한 값으로만 표현을 하기 때문에 이에 기인하는 오차도 존재하게 된다. 하지만 흡기계에 대한 소음 해석의 주된 목적은 문제시 될 수 있는 주파수 대역을 찾아내어, 이를 공명기(resonator)등을 이용하여 해결하는 것으로서, 이를 용이하게 수행하기 위해서는 4단자 정수법이 가장 적합하며, 기관 속도의 조화 성분을 통상적으로 6차 정도까지 고려하는 것을 생각해 볼 때, 관심 주파수 영역은 대략 400Hz 정도까지의 저주파 대역으로 한정되므로 4단자 정수법의 적용에 무리가 따르지 않는다.

또 다른 대안으로 제시될 수 있는 방법이 수치 해석적인 방법이다. 흔히 사용될 수 있는 것으로서, 유한 요소법(finite element method)과 경계 요소법(boundary element method)이 있는데, 경

계 요소법의 경우 계산 시간이 유한 요소법에 비해 많이 걸린다는 단점이 있지만, 모델링하는 시간을 많이 절약할 수 있는 장점때문에 이의 사용은 점점 증가되고 있다. 이러한 수치 해석적인 방법은 무엇보다도 흡기계의 형상에 구애받지 않고 정확한 해석을 할 수 있다는 장점이 있지만, 전체의 흡기계를 이러한 방법으로 모델링하는 데에는 상당히 많은 시간이 소요되고, 또한 많은 요소(element)가 필요하기 때문에 컴퓨터 용량에 제한을 받게 된다. 뿐만 아니라 경계 요소법의 경우, 평균 유속등의 효과를 고려한 식 유도가 되어 있지 않기 때문에 이러한 효과를 표현할 수 없는 문제가 있다. 하지만 일반적으로 자동차 흡기계에서의 평균 흡입 유속은 대략 $-0.1M$ (mach number)에서 $-0.15M$ 정도로서, 이 정도의 평균 유속의 효과는 400Hz 미만의 저주파 영역에서는 약간의 주파수 이동정도로서¹⁾ 미비한 것을 생각해 볼 때, 수치 해석적인 방법을 이용하여 흡기계에 대한 소음 해석을 하여도 원하는 효과를 기대할 수 있다.

전술한 바와 같이 평면파 이론을 이용한 4단자 정수법을 사용하여 흡기계 전체에 대한 해석을 수행하여도 때에 따라서 좋은 결과를 얻을 수가 있으나, 모델링할 공기 청정기(air cleaner)의 입구와 출구 부분의 거리가 짧아서, 그 공기 청정기 내부에 평면파만이 존재한다는 가정이 잘 성립되지 않을 경우에는 문제가 된다. 따라서 평면파 이론에 의한 4단자 정수법 적용시 문제될 수 있는 부분만을 수치 해석적인 방법으로 대처한다면, 두가지 방법의 단점을 보완할 수 있게 되어, 흡기계 해석의 강력한 도구로 사용될 수 있다.

이러한 모든 상황을 고려하여 본 연구에서는, 4단자 정수법을 이용하되, 덕트 부위는 평면파 이론으로 구해진 4단자 정수를 이용하고, 공기 청정기는 경계 요소법을 이용하여 구한 4단자 정수를 이용하여 전체를 해석하는 Hybrid 방법을 제시하였다.

2. 평면파 이론을 이용한 4단자 정수

흡기계는 크게 덕트, 공기 청정기, 필터(filter),

헬름홀츠 공명기(helmholtz resonator)로 분류할 수 있다. 이 중 흡기 소음의 저감 성능에 큰 영향을 주는 인자는 덕트와 공기 청정기이며, 공명기는 부가적으로 사용되어 전체의 성능을 높이는데 기여한다. 필터의 존재가 전체의 성능에 영향을 미칠 것은 분명하나, 이를 해석 상으로 명쾌히 해결하는 것은 매우 어려우며, 또한 관심 저주파 영역 내에서의 효과는 작을 것으로 가정하여, 여기서는 이의 존재를 무시하였다.

우선 평면파 이론에 의한 4단자 정수법의 타당성을 검토하기 위하여 단순 확장관(simple expansion chamber)에 대해 투과 손실(transmission loss)을 계산하였다. 단순 확장관의 모델은 그림 1과 같은데, 확장관 내부에 평면파만이 존재한다는 가정을 잘 만족시키기 위하여 단면 방향의 크기보다 길이 방향의 크기를 크게 하였다. 이 모델에 대한 4단자 정수법의 결과를 평면파 이론에 의한 이론해⁴⁾와 비교하였는데, 그림 2에서 볼 수 있듯이 평면파 이론에 의한 4단자 정수법이 잘 성립됨을 확인할 수 있다.

위의 4단자 정수법에 의한 계산 결과와 평면파 이론에 의한 이론해가 완벽히 일치함을 확인하였으나, 실제의 물리적 상황은 위의 계산 결과와 다르다. 확장관의 단면 방향의 고차 모드의 존재가 그것인데, 고차 모드의 차단 주파수(cut-off frequency) 이상이 되며, 평면파와 더불어 그 고차 모드도 전파하게 되며, 따라서 평면파만이 존재한다는 가정은 문제를 일으키게 된다. 또한 고차 모드의 차단 주파수 이하일지라도 그 고차 모드가 존재하지 않는 것은 아니며, 다만 길이 방향의 전파에 따라 지수적으로 감소될 뿐이므로, 그 길이 방향의 길이가 길지 않을 경우 충분히 감소되지 않아 그 모드의 효과가 나타나게 된다.

위에서 언급한 것과 같은 경우에 평면파 이론에 의한 4단자 정수법은 정확한 해를 주지 못함을 알 수가 있다. 이러한 문제점은 3차원 파동 방정식에 의한 경계 요소법을 이용함으로써, 해결될 수 있다.

3. Hybrid 방법

3차원 파동 방정식에 의한 경계 요소법은 고차

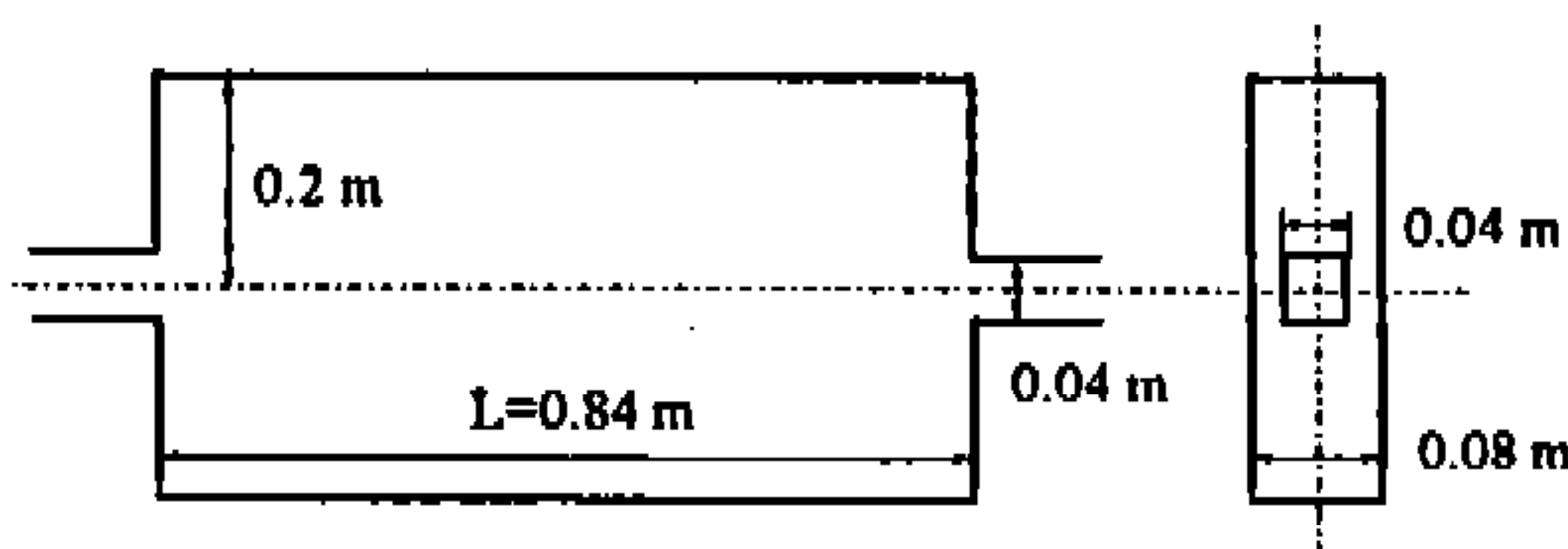


그림 1 단순 확장관의 형상 및 크기

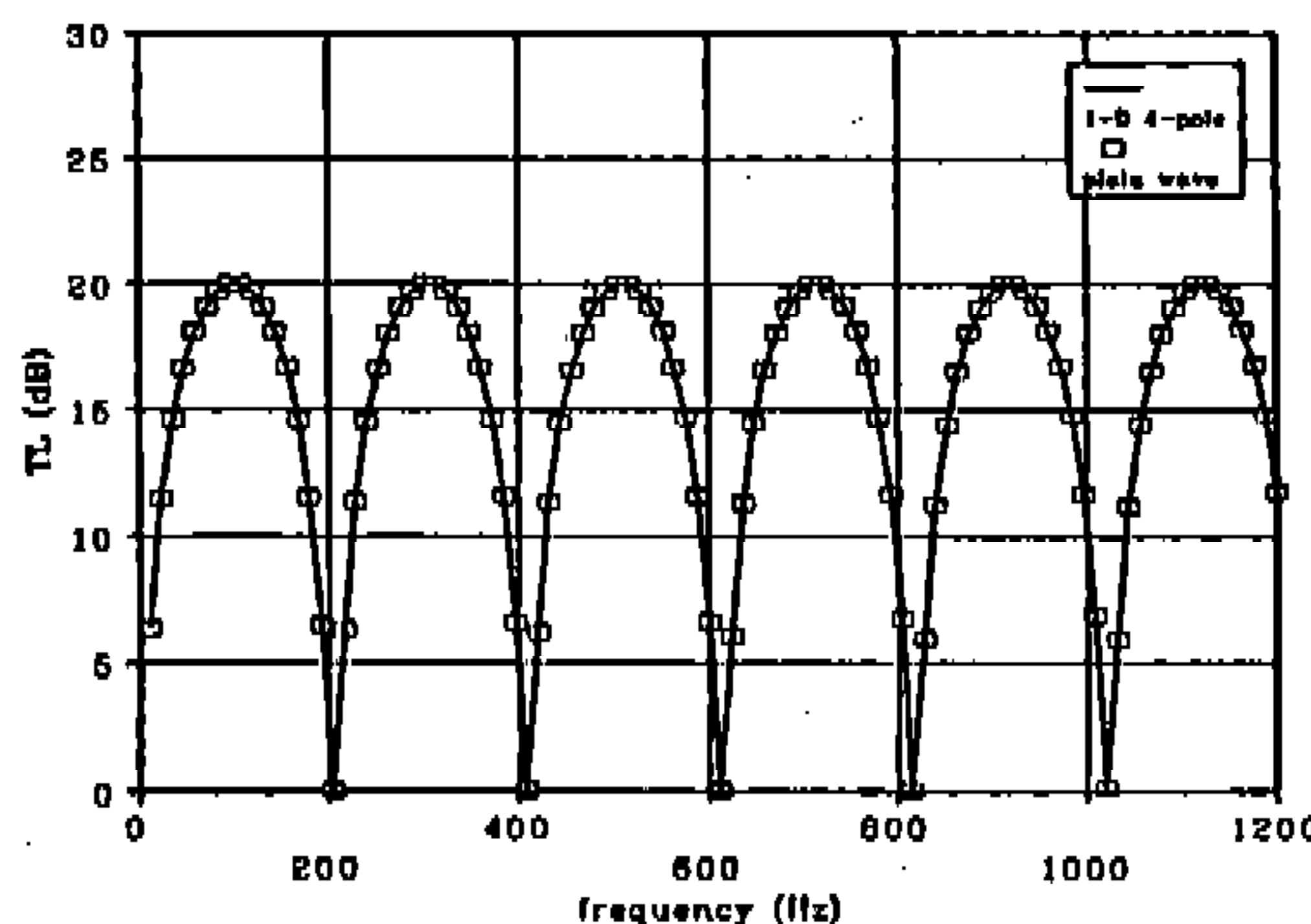


그림 2 단순 확장관의 투과 손실

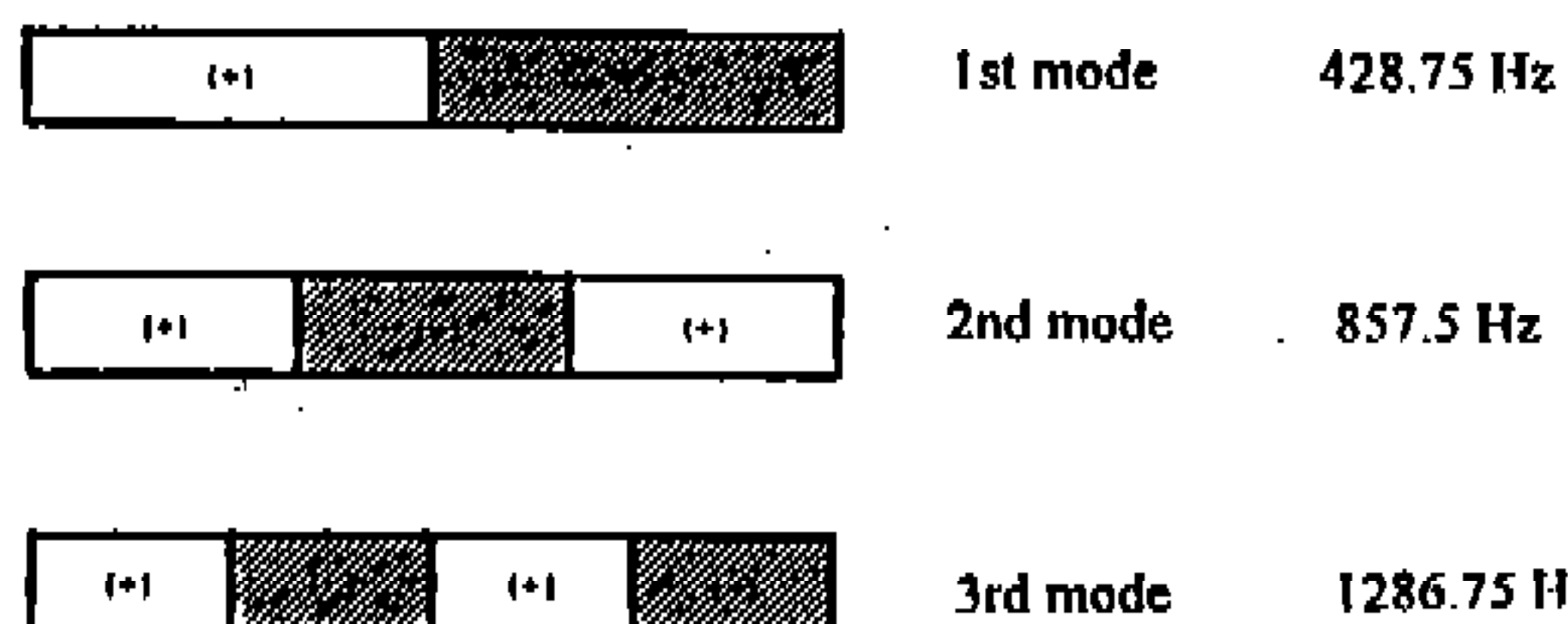


그림 3 확장관의 횡방향 고차 음향 모드

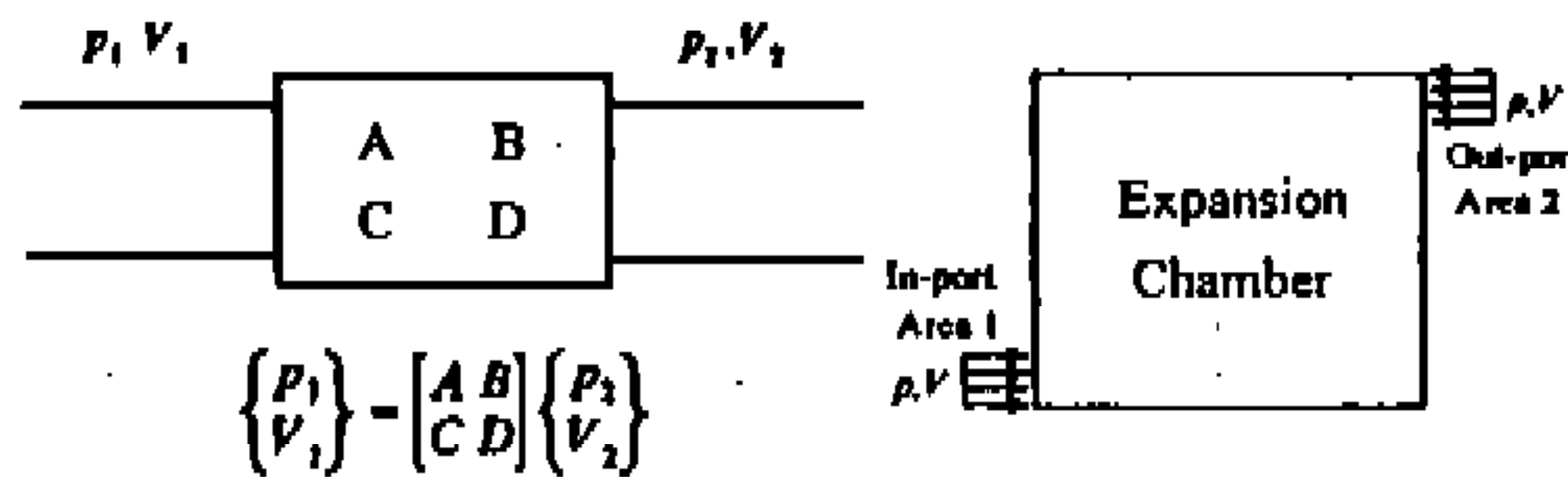
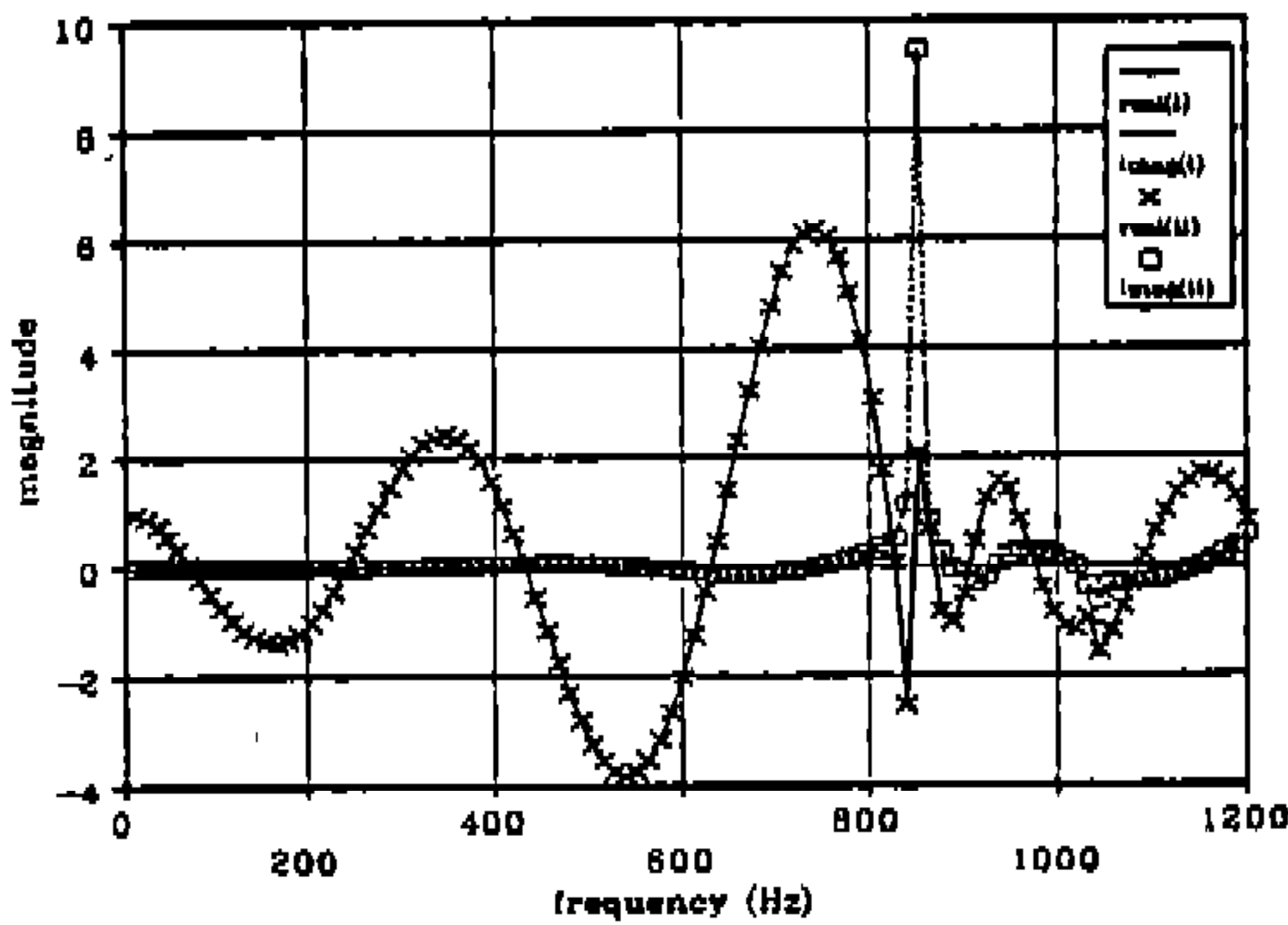


그림 4 4단자 정수 요소의 모식도

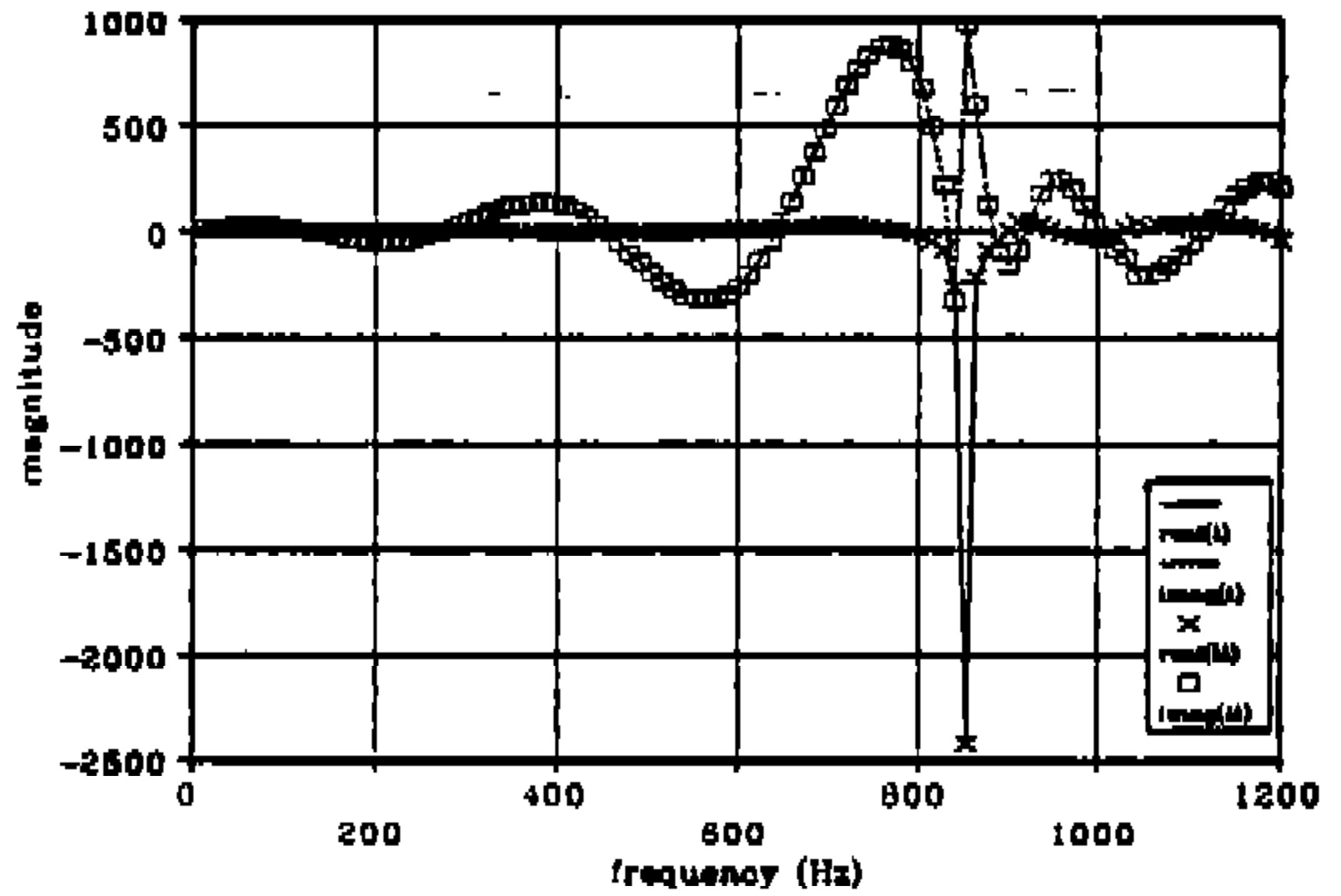
모드의 효과를 충분히 표현할 수 있다. 그러므로 그림 1의 모델에서 확장관 부분은 경계 요소법으로 모델링하고, 확장관에 붙은 덕트는 1차원으로 모델링하여 각각에 대하여 4단자 정수를 추출할 수 있다.

3.1 경계 요소법을 이용한 4단자 정수 추출

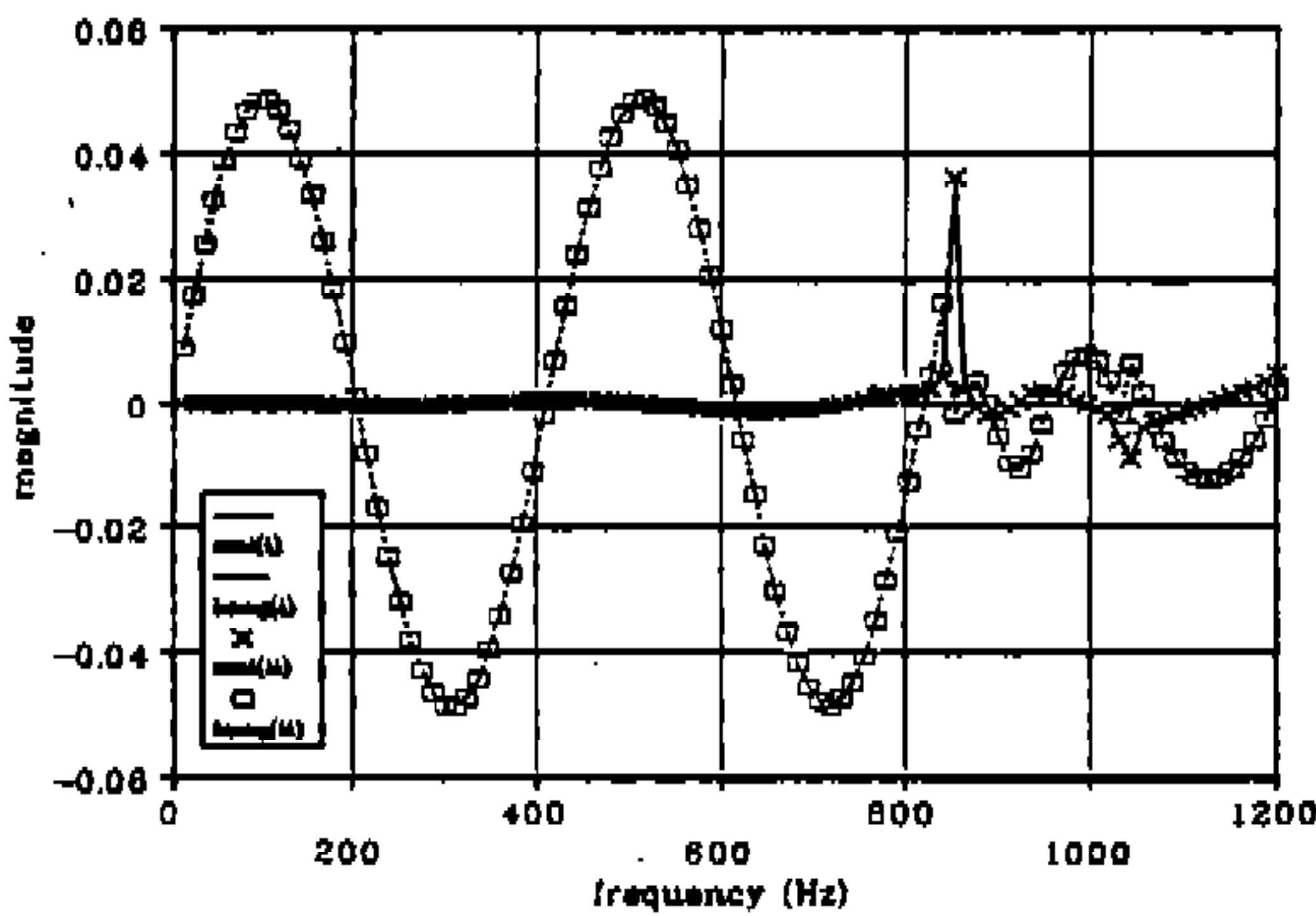
어떤 임의의 i번째 요소의 4단자 정수는 그림



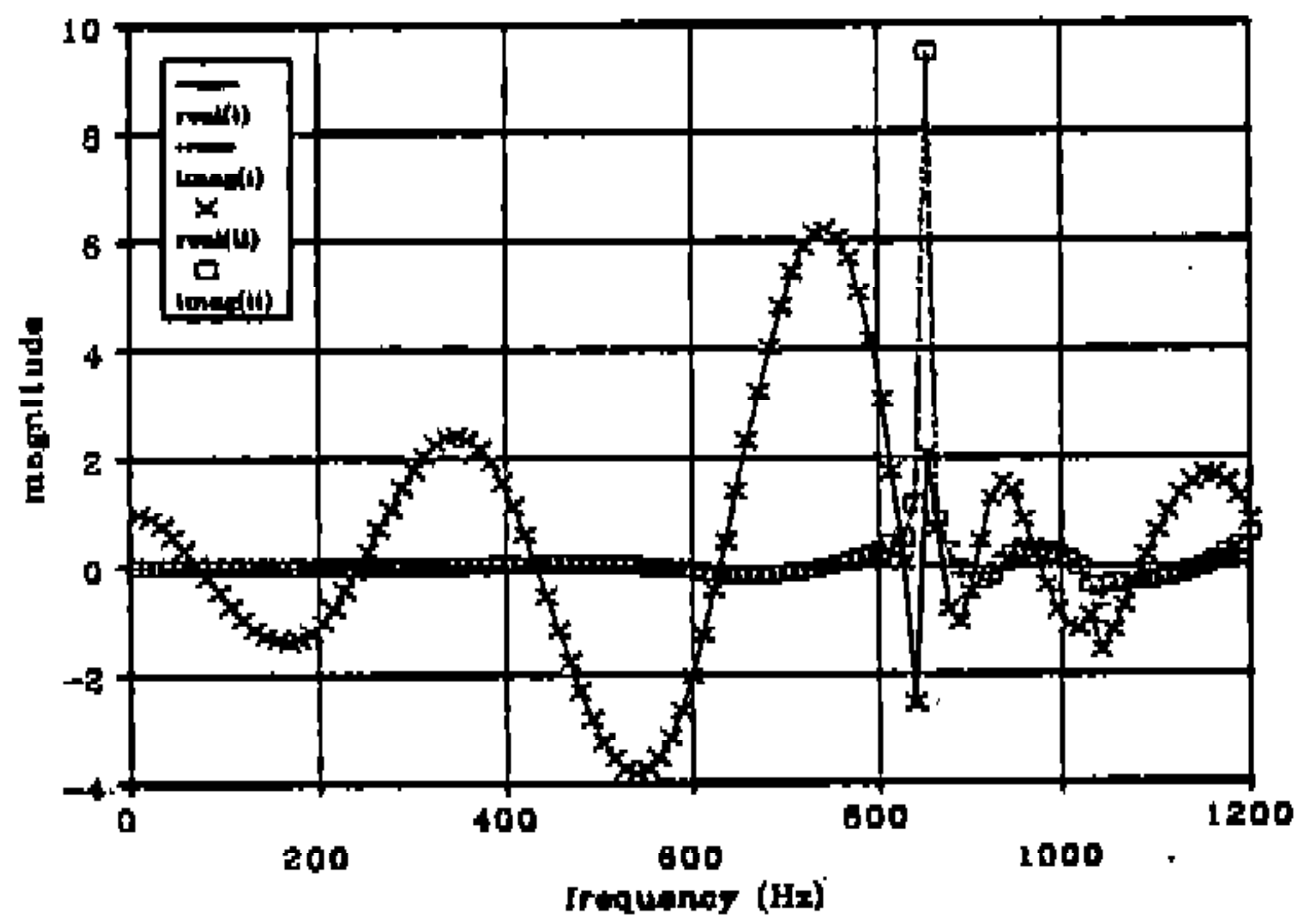
a) Coefficient A



b) Coefficient B



c) Coefficient C



d) Coefficient D

그림 5 두가지 4단자 정수 추출법의 비교

4와 같이 표현된다.

여기서 A, B, C, D의 4단자 정수를 구하기 위하여 모델에 주는 경계 조건으로 두가지를 고려하였으며, i) 입구와 출구에 각각 일정한 크기의 속도와 속도가 0인 경계 조건을 번갈아 부여하여 구한 음압과 체적 속도 사이의 관계를 이용하는 방법과, ii) 입구에는 무조건 일정한 속도를 주고, 출구부를 속도가 0인 경계 조건과 음압이 0인 경계 조건의 두가지로 주면서 구한 음압과 체적 속도를 가지고 4단자 정수를 구하는 방법의 두가지이다. 그림 5에는 그 결과를 나타내었으며, 둘 사이의 차이를 발견할 수는 없었다.

3.2 삽입 손실을 이용한 Hybrid 방법 검증

관 부위는 평면파로 모델링하고 공기 청정기에 해당하는 박스 부위는 경계 요소법으로 모델링

하여 그림 6의 모델에 대한 삽입 손실을 구하였다. 또한 그림 6의 모델 전체에 대해 경계 요소법으로 삽입 손실을 구하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 Hybrid 방법이 전체를 경계 요소법으로 구한 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 이와 같이 해석하고자 하는 전체 시스템 중, 필요한 부분만 경계 요소법을 이용하여도, 전체 계를 경계 요소법으로 구한 것과 유사한 결과가 나올 수 있다.

3.3 여러 모델에 대한 Hybrid 방법의 적용

같은 크기의 단순 확장관이라 할 지라도, 입·출구의 위치에 따라 그 소음 제어 효과가 많이 달라지게 되는데, 평면파 이론을 가지고는 이러한 효과를 설명할 길이 없다. 본 절에서는 그러한 여러 모델에 대하여, Hybrid 방법과 평면파 이론에 의한 4단자 정수법을 각각 적용하여 구한

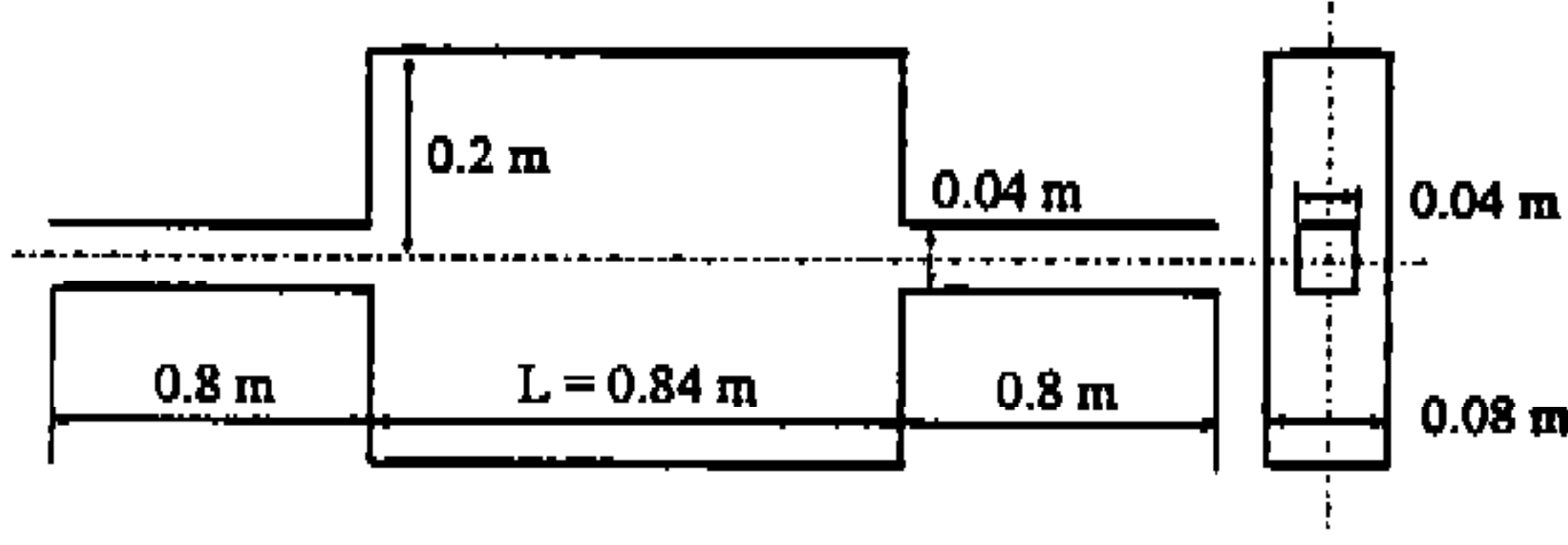


그림 6 삽입 손실 계산을 위한 모델

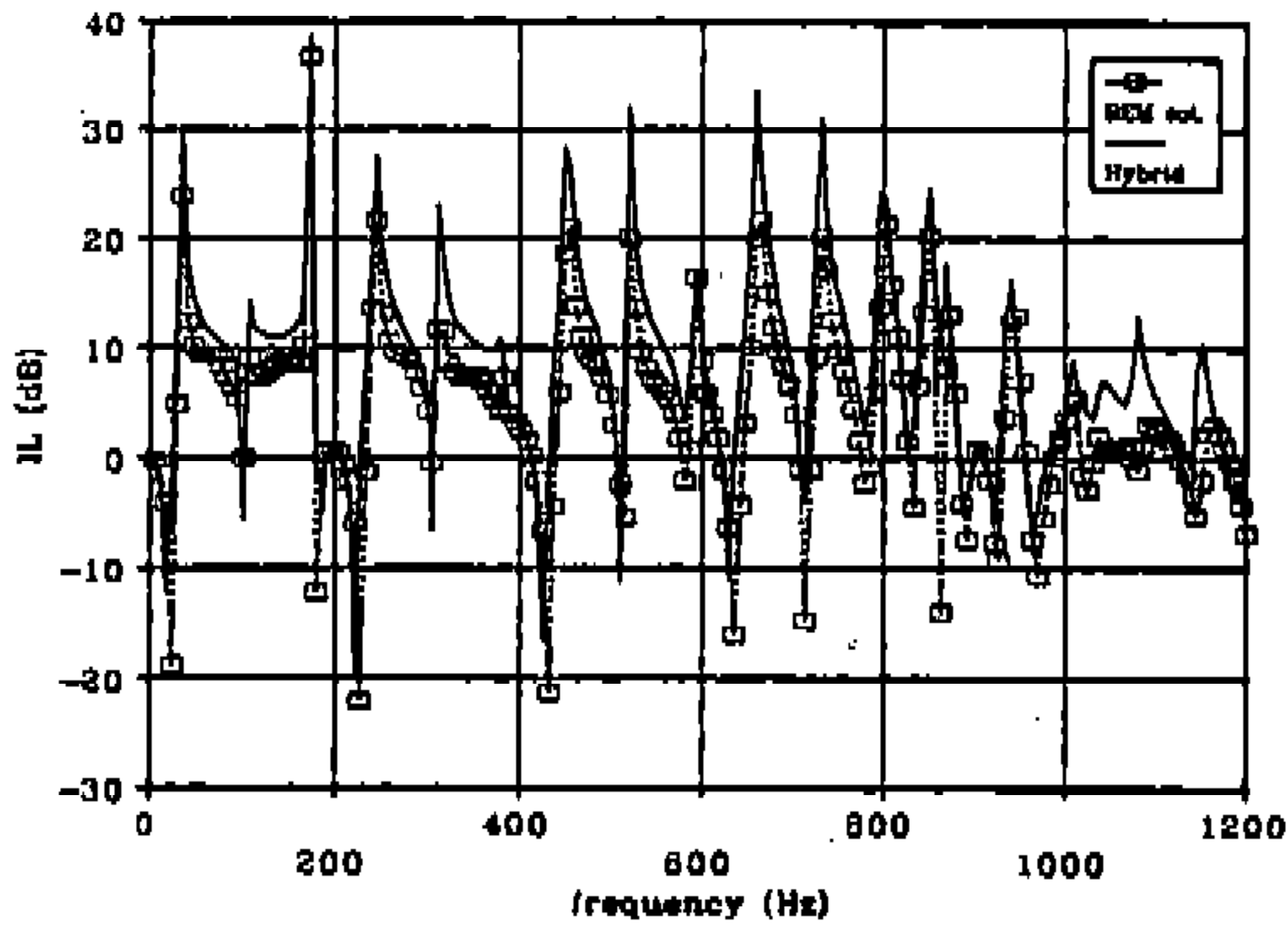


그림 7 긴 확장관에 대한 삽입 손실

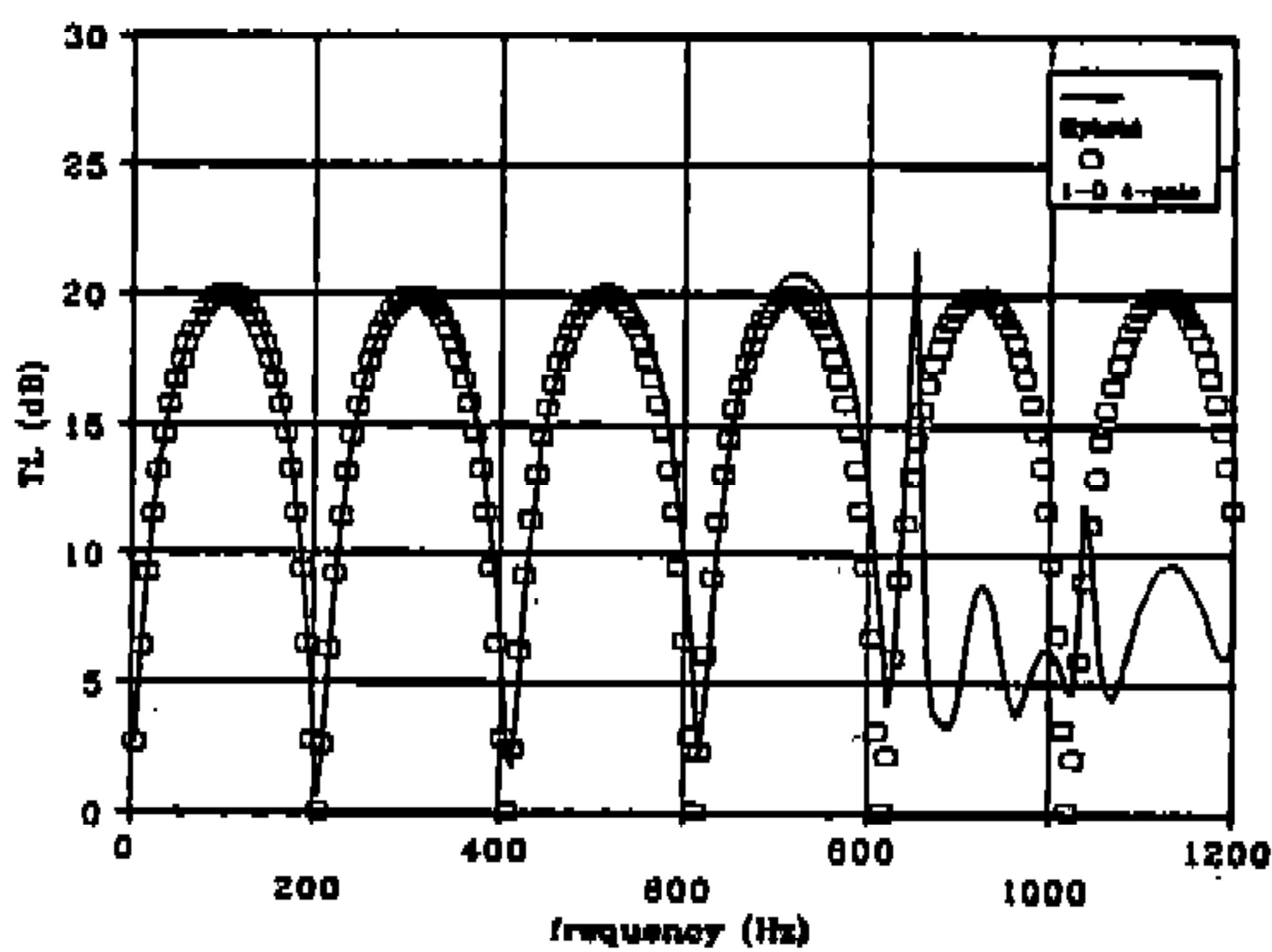


그림 8 그림 1의 모델에 대한 투과 손실

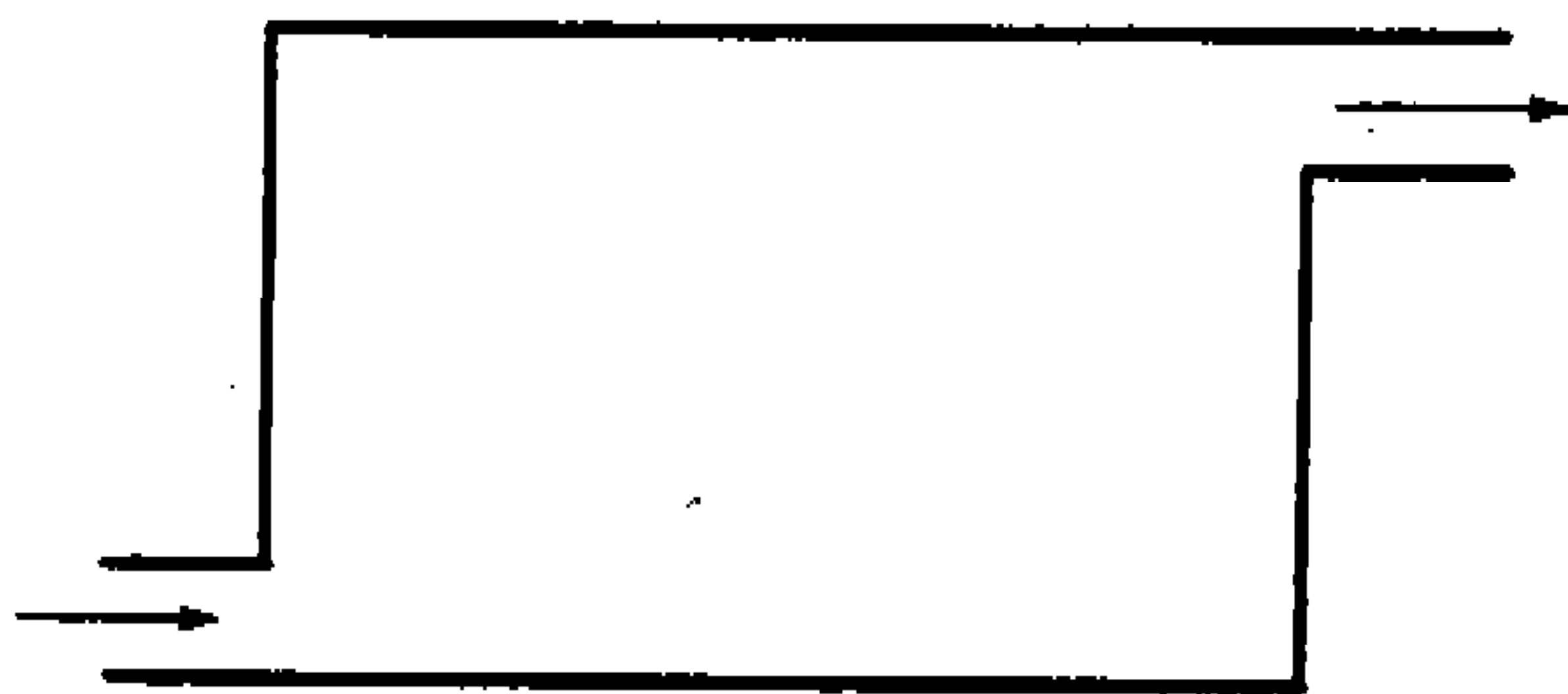


그림 9 입/출구의 위치가 다른 확장관

투과 손실을 비교함으로써 Hybrid 방법의 유용성을 보이고자 한다.

먼저 그림 1의 모델에 대하여 투과 손실을 계산하였다. 그림 8에 의하면, 대략 800Hz 정도까지는 Hybrid 방법과 1차원 4단자 정수법이 잘 맞다가, 그 이후에는 둘의 결과가 달라지는 것을 볼 수가 있다. 이는 그림 3에서 두번째 모드의 전파에 기인한 것으로서, 이 모드가 부가적으로 전파됨에 따라 투과 손실량은 감소하게 될 것이며, 그러한 효과가 Hybrid 방법에 의해 잘 예측되었음을 알 수가 있다. 여기서 첫번째 모드의 차단 주파수인 428.75Hz 이상의 영역의 투과 손실이 평면파 이론에 의한 것과 거의 같게 계산된 이유는, 확장관의 입구관이 그 확장관의 정 중앙에 위치하고 있어 첫번째 모드를 잘 가진할 수 없기 때문이다. 즉, 이 주파수 영역대에서는, 첫번째 모드가 감소없이 전파될 수 있으나, 가진 위치가 노달 라인(nodal line)에 놓임으로써 아예 첫번째 모드가 잘 발생하지 않기 때문에, 그 결과가 평면파 이론에 의한 결과와 유사하게 나오는 것이다. 만약 입/출구의 위치를 양 끝으로 바꾸어 모든 모드를 잘 가진할 수 있게 해 준다면, 그때는 그림 8과는 다른 양상을 보일 것이며, 이를 확인하기 위하여 그림 1과 크기는 같고 입·출구의 위치가 다른 모델에 대하여 계산하였다. 그림 10이 그 결과이며, 입구 위치가 첫번째 모드도 잘 가진하는 위치이기 때문에 대략 400Hz 이상의 영역에서 투과 손실 곡선이 평면파 이론에 의한 것보다 급격히 떨어지는 것을 볼 수가 있다. 이와 같이 Hybrid 방법에 의해, 평면파 이론이 표현할 수 없는 고주파 영역에서도 정확한 결과를 보여 줌을 알 수 있었고, 또한 저주파 영역대만을 고려한다면, 평면파 이론에 의한 해석도 매우 정확하기 때문에 굳이 Hybrid 방법을 사용할 필요는 없다고 판단된다.

그러나 위의 모델은 음향학적으로 긴 관이라는 가정이 잘 만족되는 조건이나, 실제의 공기 청정기에 대하여 이러한 가정이 잘 만족되지 않는다. 이것을 검토하기 위하여 그림 1의 모델과 단면 방향으로 크기가 같고, 대신 확장관의 길이가 매우 짧은 모델을 만들고, 이에 대하여

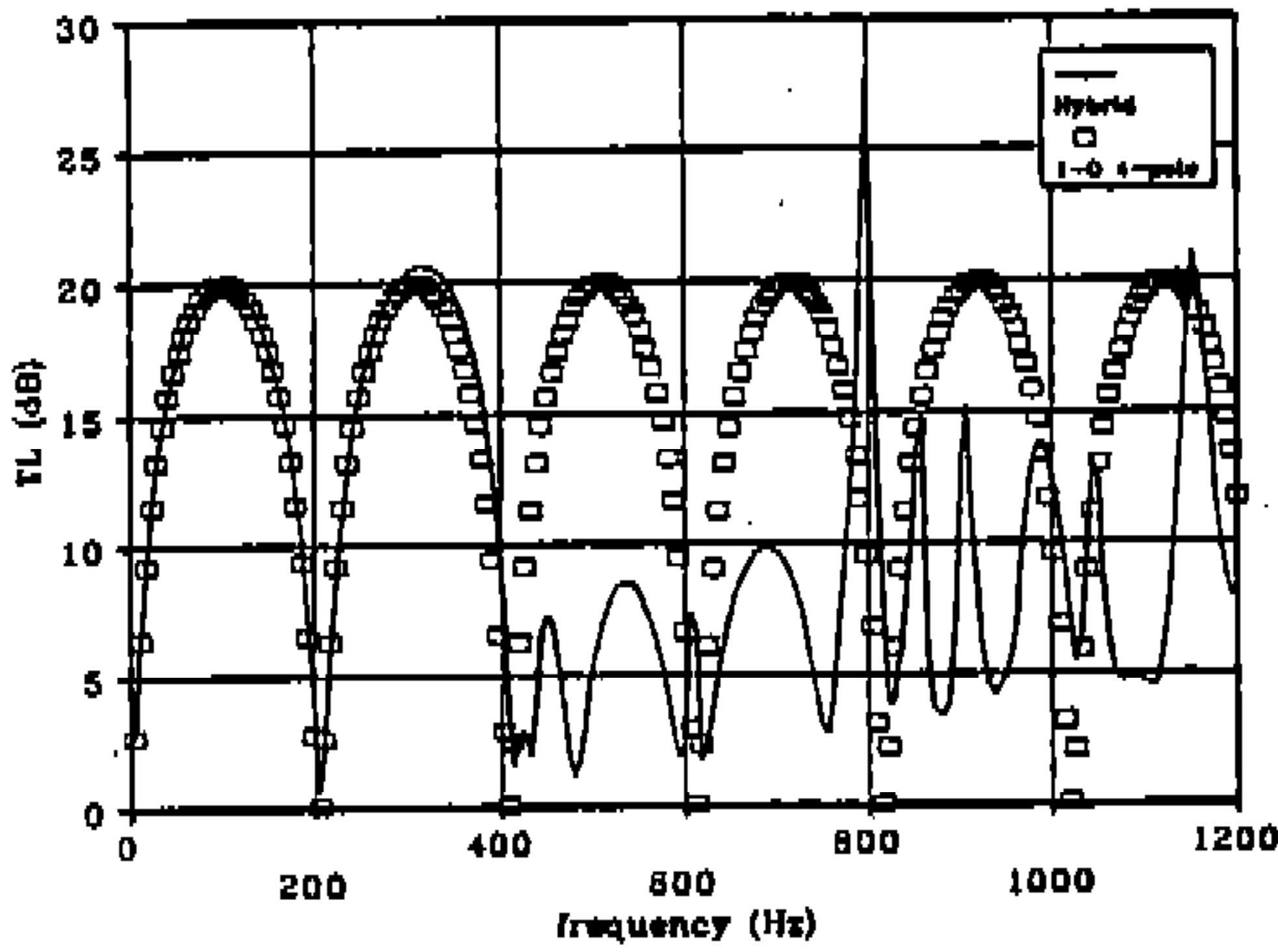
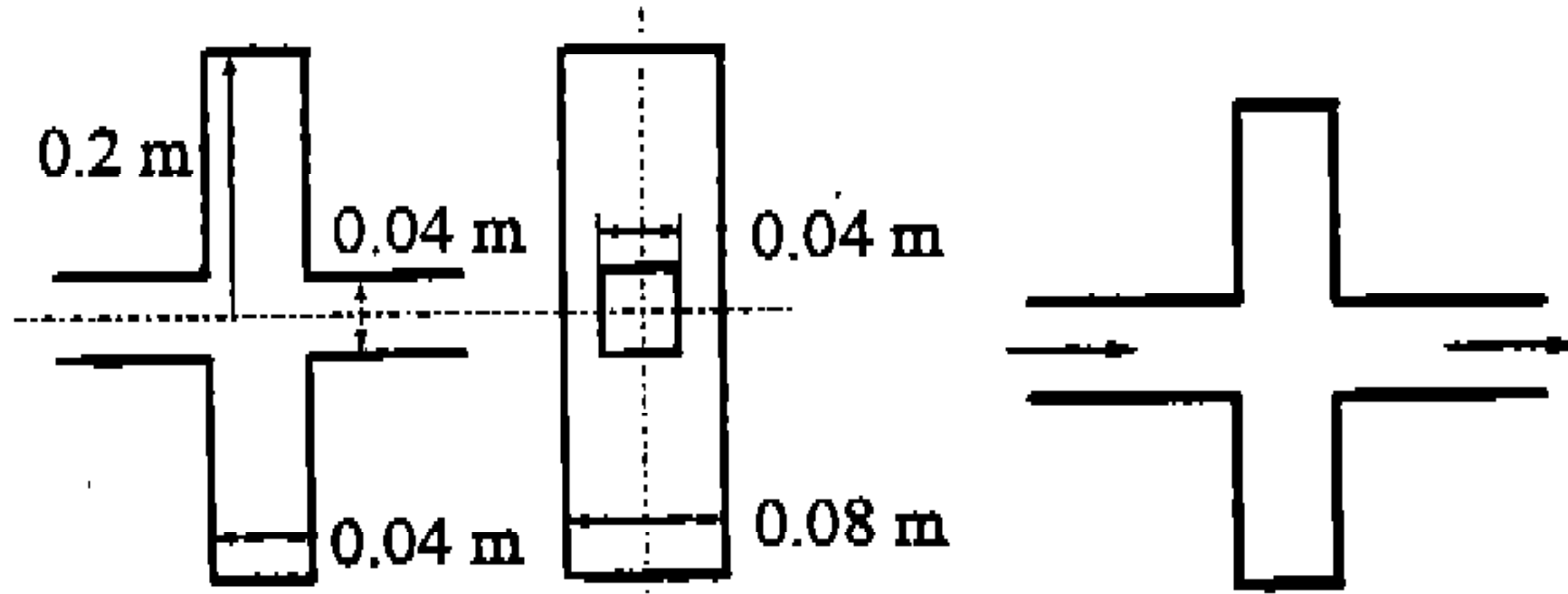
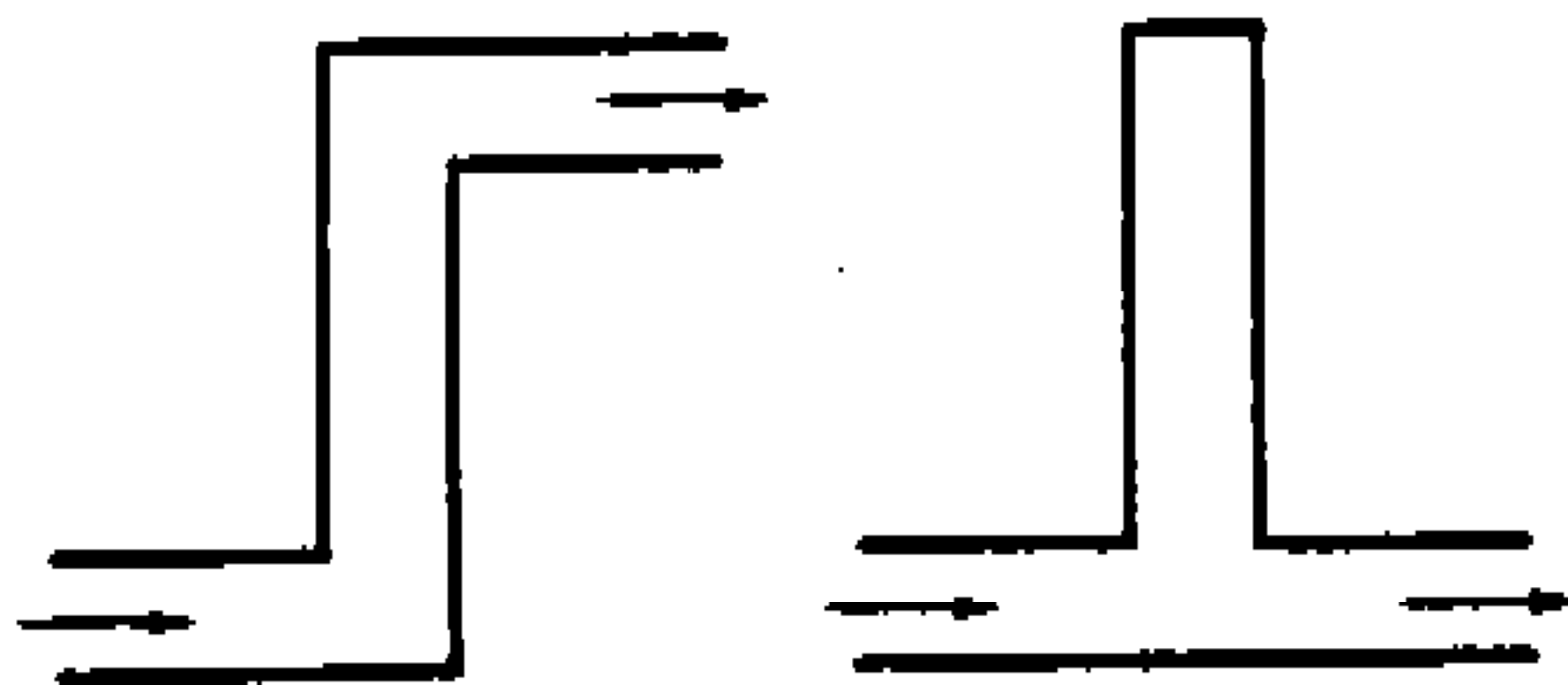


그림 10 그림 9의 모델에 대한 투과 손실



a) 짧은 확장관의 모델

b) 경우 1



c) 경우 2

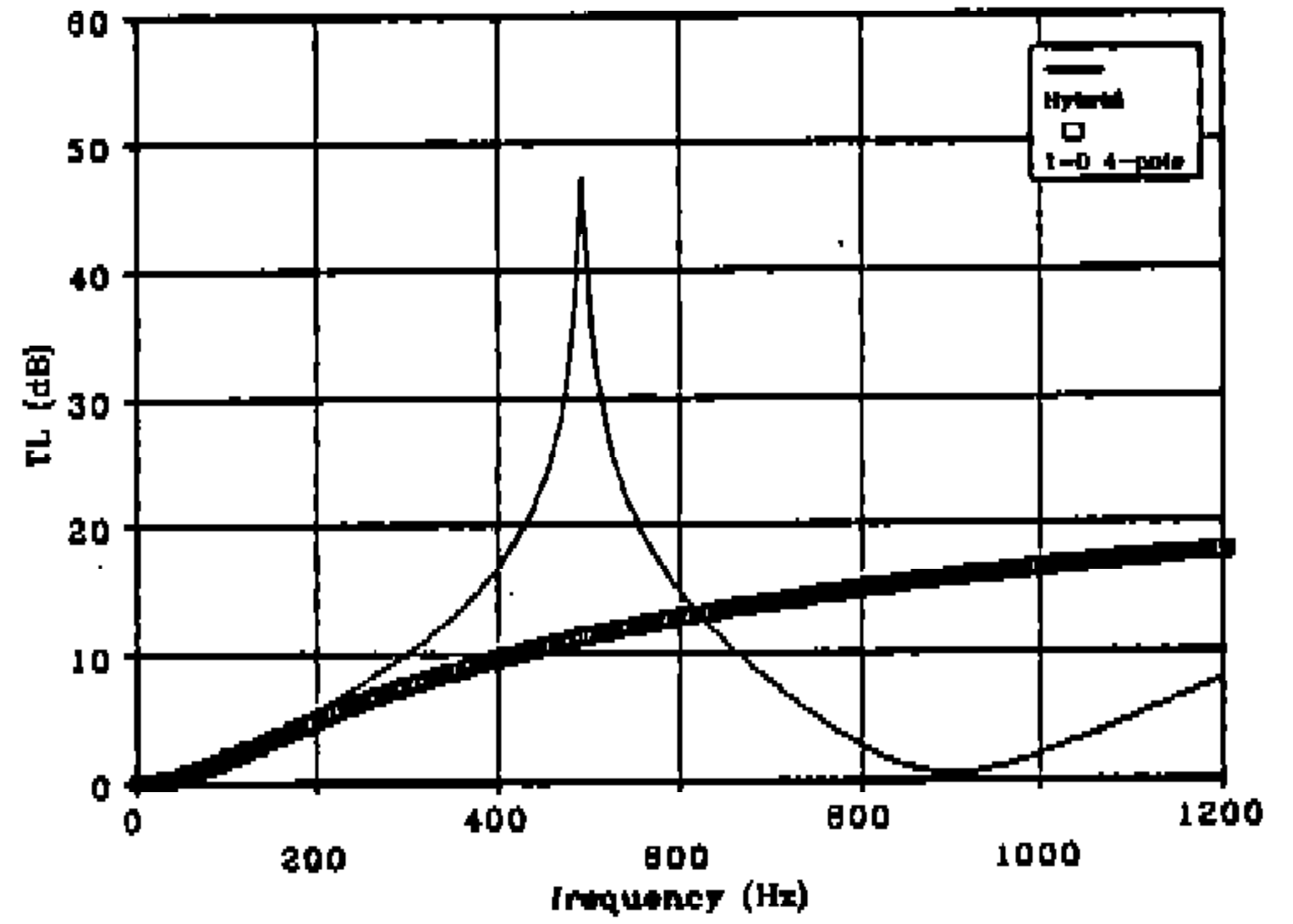
d) 경우 3

그림 11 짧은 확장관의 크기 및 입/출구의 위치

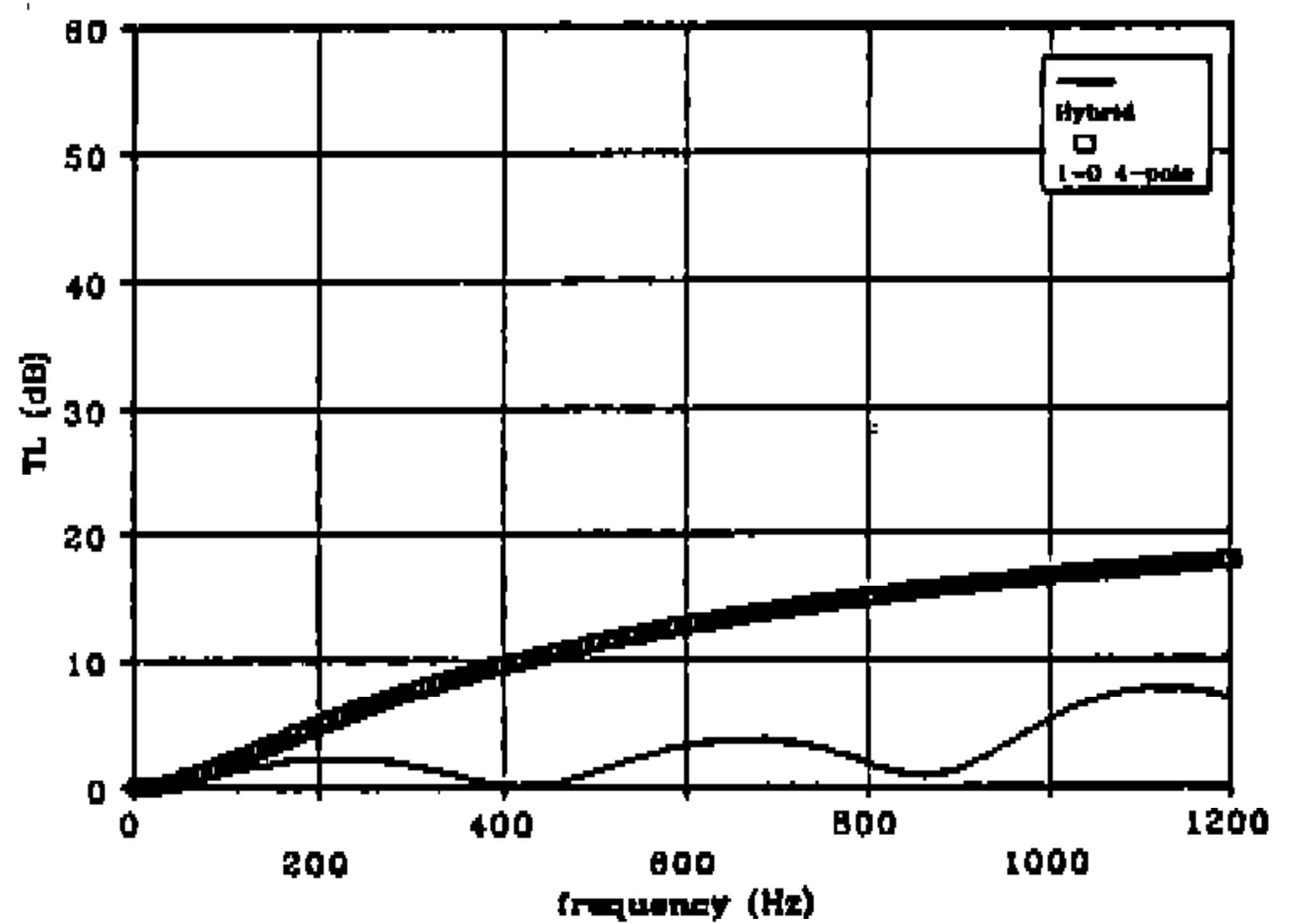
평면파 이론에 의한 4단자 정수법과 Hybrid 방법을 각각 적용시켜 계산하였다.

그림 12는 그 결과를 나타낸 그림이다.

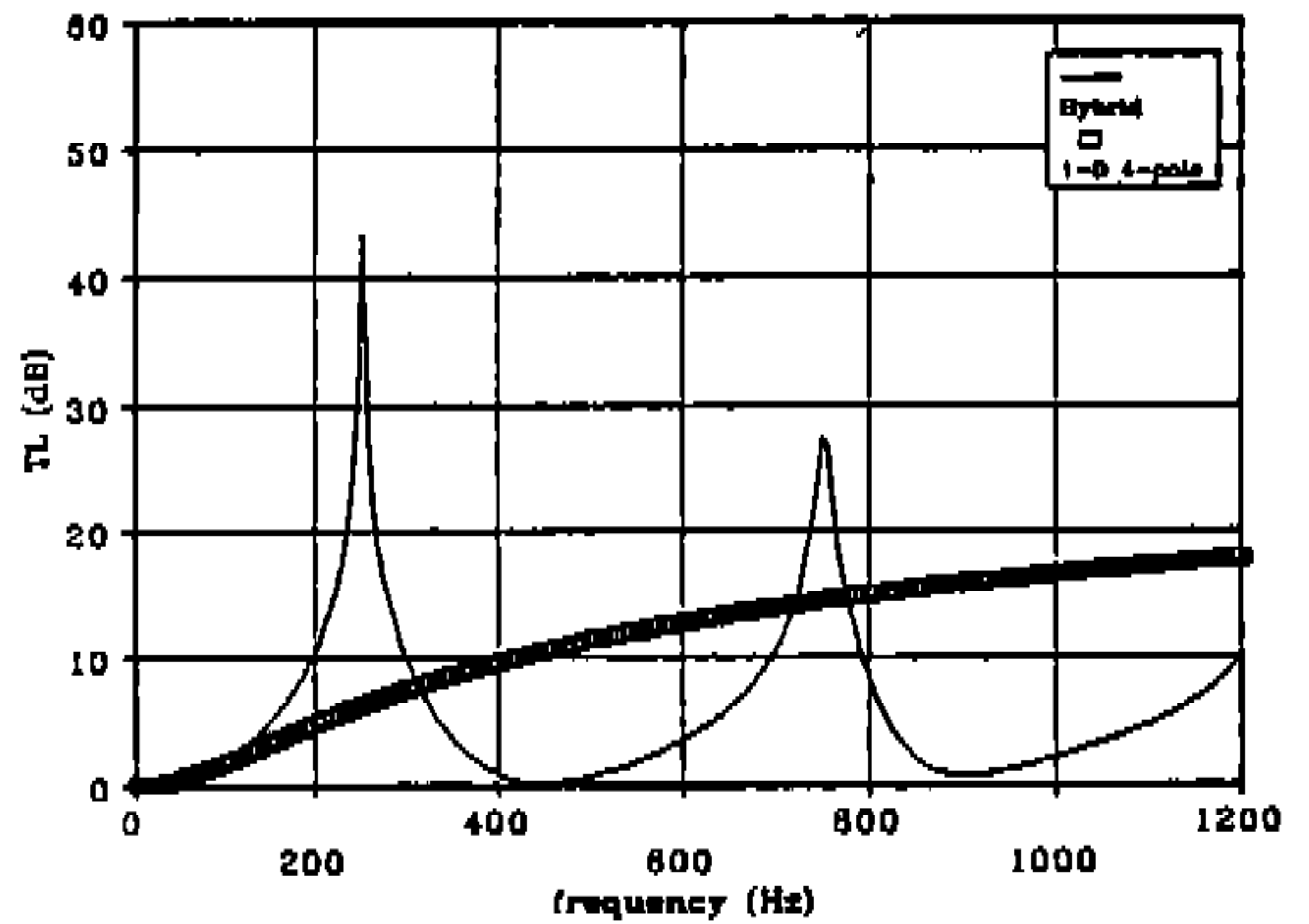
세가지의 입·출구 조합이 계산되었으며, 그 어느 것도 평면파 이론에 의한 결과와 완전히 다른 양상을 보이고 있다. a)의 경우는, 직관에 두개의 같은 주파수를 갖는 $\lambda/4$ 공명기가 부착된 것으로 간주할 수 있으며, 그러므로 그러한 공명기의 공진 주파수 부근에서 투과 손실이 급격히 증가할 것을 예상할 수 있는데, Hybrid 방법에 의한 계산은 그러한 결과를 잘 보여 주고 있다.



a) 경우 1의 투과 손실



b) 경우 2의 투과 손실



c) 경우 3의 투과 손실

그림 12 그림 11의 모델에 대한 1-D 4단자 정수법과 Hybrid 방법이 비교

b)의 경우, 전체를 직각으로 두번 굽은 관으로 간주할 수 있으며, 그러므로 이러한 경우의 투과 손실은 거의 0에 가깝게 되는데, 위와 마찬가지로 Hybrid 방법에 의한 계산은 이를 잘 나타내고 있다. c)의 경우는, a)와 유사하게 $\lambda/4$ 공명기가

붙어 있는 관으로 볼 수 있으며, 그 공명기의 길이가 a)의 약 2배에 해당하므로, 투과 손실이 매우 커지는 공진 주파수가 a)의 빈 정도에서 나타나고 있으며, $3\lambda/4$ 가 되는 주파수에서도 다시 투과 손실이 증가하는 것을 볼 수가 있다.

위에서 본 바와 같이 입·출구 사이의 거리가 짧은 경우, 평면파 이론에 의한 결과는 매우 부정확하며, 반대로 Hybrid 방법은 타당한 결과를 보여 줌을 알 수가 있었다. 또한 위와 같이 평면파 이론에 의한 계산이 부정확해지는 짧은 관의 경우뿐만이 아니라, 입구와 출구가 같은 면에 있다든가, 마주 보지 않는 다른 면에 있다든가 하는 평면파 이론을 적용시킬 수 없는 경우에도, Hybrid 방법은 별다른 문제없이 적용될 수 있다.

4. 자동차 흡기계에서의 적용

위에서 제안한 Hybrid 방법에 의하여 현재 개발 중에 있는 자동차의 흡기계 전체에 대하여 소음 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 문제의 주파수 영역을 찾고, 그 소음 저감 성능을 높이기 위한 작업이 현재 진행 중에 있다. 그림 14에 사용된 성능 지수는 관찰 투과 손실(observed transmission loss)로서⁴⁾, 이는 음원에 해당하는 엔진 부위의 임피던스가 무한대라고 볼 수 없으므로⁵⁾, 보다 실제적인 성능 지수인 삽입 손실을 예측하기 위해서는, 엔진의 임피던스를 실제로 측정하여야 하나, 측정 장비의 문제로 인하여 이를 측정하지는 못하였으며, 또한 전체 흡기계의 문제 주파수 영역을 찾아내는데에는 관찰 투과 손실만으로도 충분하므로 별다른 문제는 없다.

5. 결 론

자동차의 흡기계와 같은 덕트계의 소음 저감 성능을 해석함에 있어서, 일반적으로 쉽게 사용될 수 있는 방법은 4단자 정수법이다. 그러나 일반적인 4단자 정수법은 평면파 이론에 의하여 구해졌기 때문에, 길이 방향으로 충분한 길이를 갖지 못한 흡기계의 공기 청정기 같은 부분에 대하여 정확한 계산을 할 수가 없다. 이러한 단

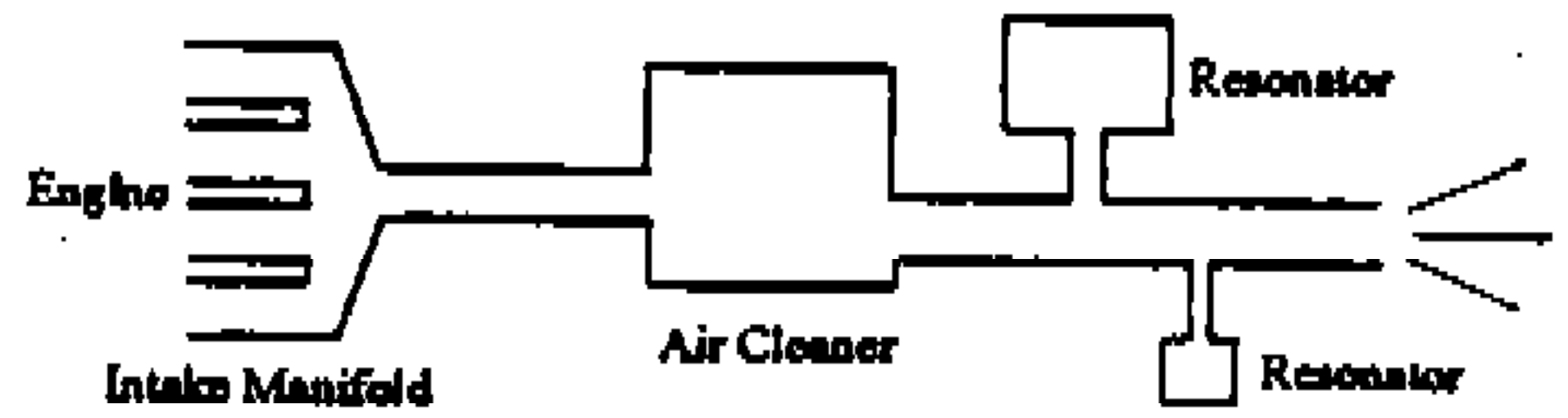


그림 13 단순화된 흡기계의 모델

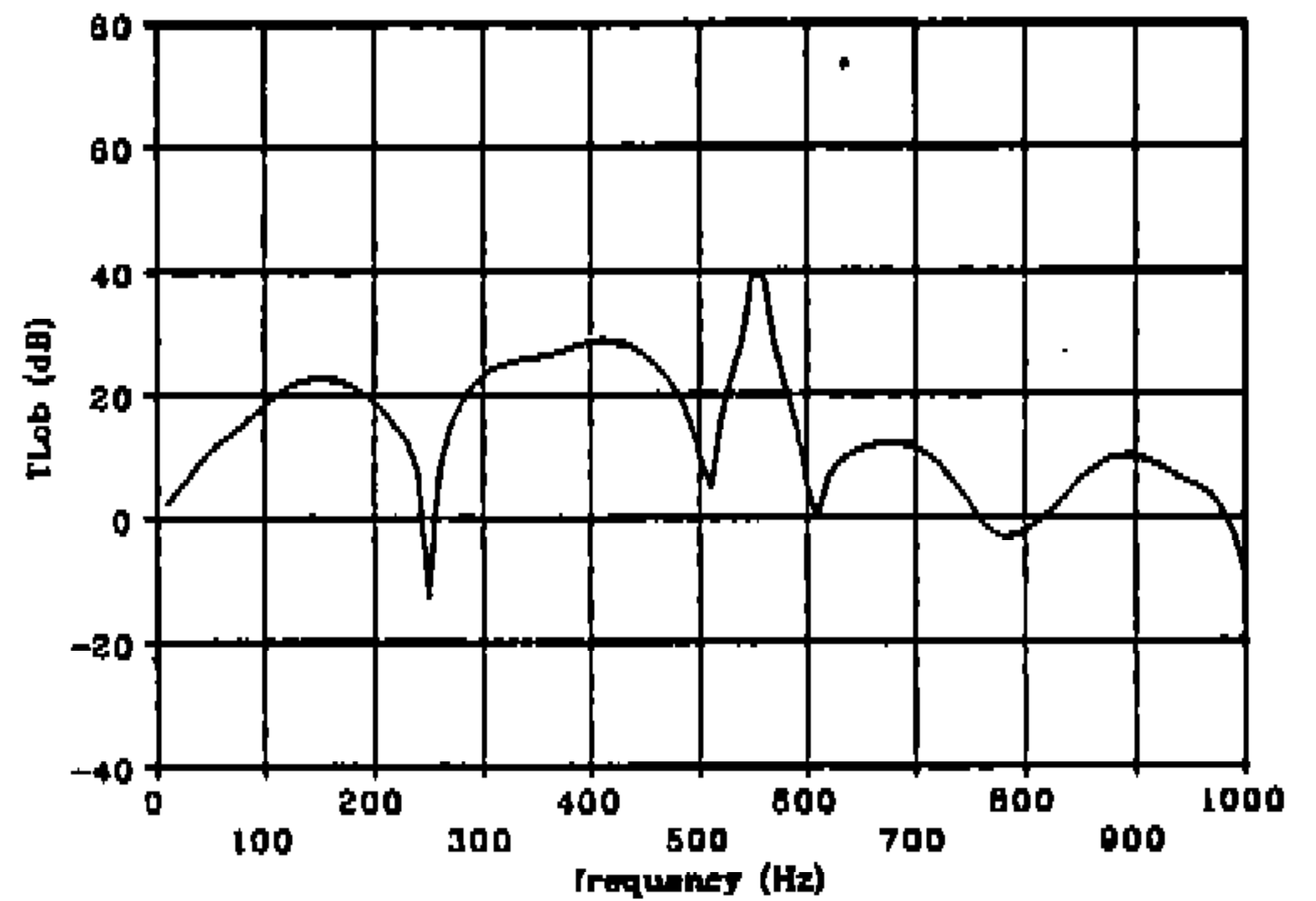


그림 14 흡기계 전체에 대한 관찰 투과 손실

점을 보완하기 위하여, 경계 요소법과 복합하여 덕트계를 해석하는 Hybrid 방법을 제시하였으며, 전형적인 예제들을 통하여 이의 타당성을 검증하였다.

Hybrid 방법은 기존의 일반적인 평면파 이론만에 의한 4단자 정수법을 적용시킬 수 없었던, 길이가 짧은 단순한 확장관이나 역류형 소음기, 그리고 형상이 복잡한 요소등에서도 정확한 해를 줄 수 있는 장점을 지니며, 또한 상대적으로 단순한 덕트 부위에 대해서는 일반적인 4단자 장수요소를 사용함으로써, 덕트계 전체에 대하여 수치 해석적인 방법을 동원하는 것보다, 전체적인 설계 변경이 용이하며, 또한 계산 시간이 단축되는 장점을 지니고 있다. 그러나 경계 요소법에 의해 구한 4단자 정수에는, 유체의 여러 비선형 요소들, 즉 평균 유속에 의한 효과, 열-점성 손실 등에 의한 효과 등이 배제되어 있기 때문에 이에 따른 오차가 발생되며, 간혹 수치적인 오차에 기인한 듯한 음의 투과 손실이 나오는 문제가 발생되었으므로, 이와 같은 문제점에 대하여 앞으로 많은 연구가 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. J.G. Ih and B.H. Lee "Analysis of higher-order mode effects in the circular expansion chamber with mean flow", JASA 77, 1985
2. J.G. Ih and B.H. Lee "Theoretical prediction of the transmission loss of circular reversing chamber mufflers", J.S & V 112(2), 1987
3. S.I. Yi and B.H. Lee "Three-dimensional acoustic analysis of circular expansion chambers with a side inlet and a side outlet", JASA 79(5), 1986
4. L.J. Eriksson 'Noise control in internal combustion engines', edited by D.E. Baxa, chap.5, Wiley Interscience, 1982
5. M.G. Prasad and K.J. Crocker "Studies of acoustical performance of a multi-cylinder engine exhaust muffler system", J.S & V 90(4), 1983
6. P.O.A.L. Davies "Practical flow duct acoustics", J.S & V 124(1), 1988
7. R.J. Alfredson and P.O.A.L. Davies "Performance of exhaust silencer components", J.S & V 15(2), 1971
8. Y. Nishio, T. Kohama and O. Kuroda "New approach to low-noise air intake system development", SAE 911042
9. L.J. Eriksson "higher order mode effects in circular ducts and expansion chambers", JASA 68(2), 1980
10. M.L. Munjal 'Acoustics of ducts and mufflers', John Wiley & Sons, 1987
11. P.M. Morse and U.K. Ingard 'Theoretical acoustics', McGraw Hill, 1968
12. 이장명, 권오상, "흡기계 해석에서의 BEM의 응용", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 1994