

가스터빈 고온부품 국산화를 위한 냉각기술 개발

이 글에서는 고온의 연소가스로부터 가스터빈의 고온 부품을 보호하기 위한 냉각기술들에 대해 알아보고, 국내에서 어떻게 연구되고 있는지에 대해 소개하고자 한다.

가스터빈 엔진의 효율 및 성능을 높이기 위해서는 압축기의 압축비를 올리거나, 터빈입구온도를 높여야 한다. 특히, 높은 열효율을 얻기 위하여 최근 터빈입구온도를 1,500~1,700°C 까지 올려 작동시키고 있으며, 열효율을 더욱 높이기 위해 터빈입구온도를 연평균 20°C 꾸준히 상승시켜 설계하는 추세이다. 이는 요소재료의 열한계점인 900°C를 훨씬 상회하며, 이와 같은 입구온도의 고화 경향은 터빈요소에 대한 열부하를 크게 증가시키고 있다. 또한, 최고부하조건에서 운전되는 가스터빈요소의 벽면온도를

10°C 정도 낮출 경우 그 수명이 두 배까지 증가되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 터빈입구온도를 상승시키며 터빈요소 벽면온도를 낮추기 위해서 소재기술, 코팅기술과 더불어 여러 가지 다양한 냉각기술들이 연구·개발되어 왔으며, 이 기술은 현재 국내에서 수행되고 있는 1,350°C급 발전용 터빈 베인 및 블레이드 냉각기술 개발에 적용되고 있다. 그러므로 이 글에서는 가스터빈에 적용되는 대표적인 냉각방법으로 막냉각, 내부관 냉각, 총돌제트냉각 등에 대해 언급하고, 이들의 국내 개발 동향 및 경향에 대해 언급

하고자 한다.

막냉각 기술

막냉각은 고온가스와 접촉하는 부품 표면과 일정한 각도를 이루는 구멍 또는 슬릿을 통해 냉각공기를 유출시켜 냉각공기가 블레이드의 외부벽에 저온의 얇은 막을 형성하여 고온가스로부터 블레이드로의 열전달을 감소시키는 방법으로, 그림 1은 막냉각의 개념도를 보여주고 있다. 일반적으로 막냉각 효율은 2차원 슬롯을 통해 막냉각시키는 경우가 제일 높은 것으로 알려져 있지만,

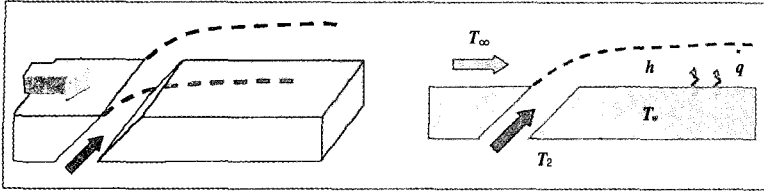


그림 1 막냉각 개념도

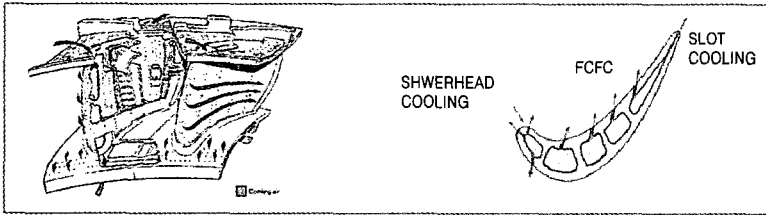


그림 2 막냉각이 적용되는 터빈 베인 및 블레이드

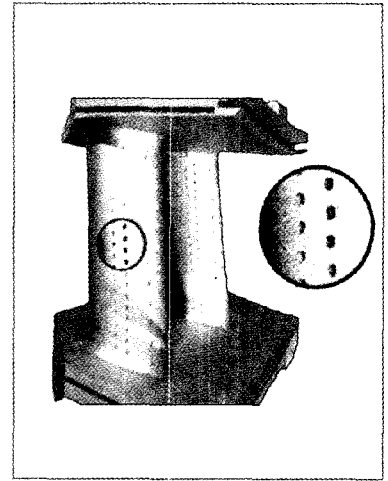


그림 3 GE7FA 1단 노즐

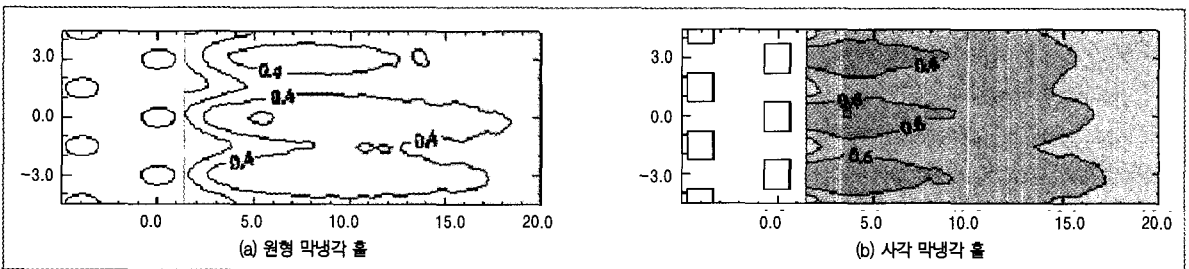


그림 4 막냉각 홀 형상에 따른 막냉각 효율 분포

부품의 강도 등 여러 문제로 인하여 일반적으로 그림 2와 같이 원형 홀을 통해 분사되는 형태를 갖으며, 막냉각은 일렬, 혹은 2열 이상의 여러 냉각 홀을 통해 표면을 보호하게 된다.

막냉각에 관련된 주요 연구는 가공의 편의성으로 인해 요소 표면에 원형홀을 가공하여, 이를 통한 막냉각이 주로 이루어져왔다. 따라서 원형홀을 이용한 막냉각에 대하여 분사비, 분사각도 변화를 비롯하여 주유동(고온 연소가스)의 조건변화 및 냉각면 형상변

화 등에 따른 막냉각 성능평가에 대한 연구가 진행되었다. 그러나 원형홀로 인해 불균일한 냉각성능을 갖는 등 여러 문제점이 나타나기 시작했다. 따라서 1990년대 초부터 이를 보완하고 냉각성능을 향상시키기 위하여 복합각도 분사(compound angle injection), 막냉각 홀 배열 변화 등에 대한 연구를 수행하여 왔다.

가공기술이 발달하면서 최근에는 그림 3에서와 같이 사각형상의 막냉각 홀을 이용한 냉각방법 연구가 이루어지고 있다. 사각형

태의 막냉각 홀은 2차원 슬롯과 유사한 형태를 갖기 때문에 그림 4와 같이 사각 홀의 경우가 매우 높고 균일한 냉각효율을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 출구가 확장되는 형상의 변형된 막냉각 홀을 이용하는 경우 막냉각 홀 출구에서 냉각유체의 운동량을 감소시키고 유체가 표면에 잘 퍼지도록 하는 효과를 갖기 때문에 매우 높은 냉각성능을 기대할 수 있다. 이러한 변형된 형상의 막냉각 홀에 대한 연구는 1990년대 중반 이후 해외 유수의 가스터빈

향후 국산 발전용 가스터빈 독자모델 개발 및 성능 개선 등을 위해서는 제조기술과 더불어 설계기술 확보가 필수적이다. 특히 고온 고온부 설계 및 성능향상과 밀접한 관계에 있는 고온부의 열전달 해석 및 냉각 설계기술에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

출을 표면에 가공하여 균일한 냉각성능을 얻도록 하는 전면 막냉각 방법(full coverage film cooling)이 최근 활발히 연구·개발되어 실제 연소실 벽면 또는 1단 베인에 적용되고 있으며, 국내 연구결과를 토대로 국산화되어 가고 있다.

내부유로냉각 기술

내부관 대류냉각은 초기부터 사용된 가스터빈 냉각 방법으로 써 냉각공기를 연소실 벽면을 비롯하여 터빈 베인, 블레이드의 내부 유로를 통하여 공급하여 고온의 연소가스에서 부품으로 전달되는 열을 흡수·방출시키게 된다. 일반적으로 내부관 냉각은 열전달 면적을 크게 하고 그림 6에 나타난 것과 같이 열전달계수를 높이기 위하여 유로 내에 난류촉진기(요철 : rib turbulator)나 흰(fin)을 설치한다.

내부관 냉각의 경우, 그림 6에 제시된 것과 같이 요철 혹은 핀-흰의 형상 및 배열, 충돌각(attack angle), 유로의 형상 혹은 종횡비(aspect ratio) 등 다양한 조건에 따라 냉각성능이 변화한다. 또한, 내부관 냉각에서는 관내 압력강하가 발생하기 때문에 보다 효과적인 냉각을 위해서는 내부관에서의 압력강하 특성을 고려한 설계가 필수적이다. 따라서 이러한 다양한 조건에서 최적의 요철 배열 및 형상 등에 대

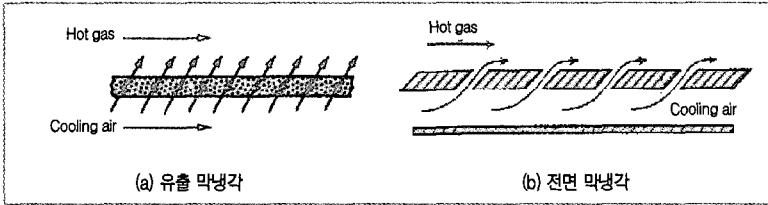


그림 5 막냉각 기술

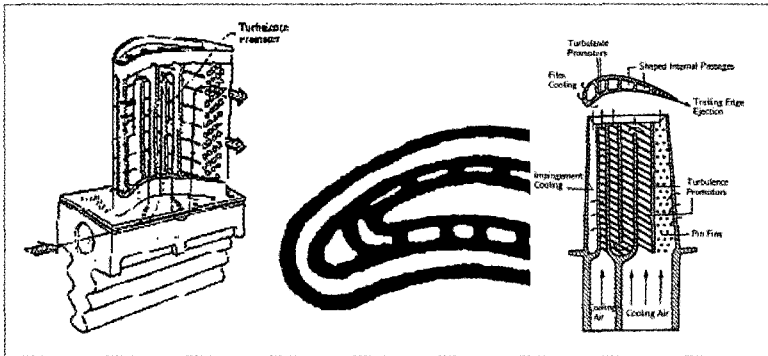


그림 6 내부관 냉각이 이루어지는 터빈 블레이드

제조업체, 대학 및 연구소 등과 함께 국내에서도 역시 활발하게 연구되어 왔으며, 더 나아가 타원형, 사각형 등 다양한 출 형상과 작동조건에 대한 연구가 수행되었다.

이 밖에도 막냉각 방법 중 그림 5(a)와 같이 가장 진보된 유출막냉각(transpiration cooling or effusion cooling)은 블레이드 전면을 다공판으로 제작하여 냉각공기를 고온요소

표면으로 일정하게 누출시킴으로써 외벽에 지속적인 저온의 공기막을 형성하여 막냉각과 같은 효과를 얻는 방법으로서, 냉각방법에 있어서는 다른 방법과 비교하여 볼 때 가장 효과적인 것으로 알려져 있으나 구멍이 산화되거나 이물질에 의하여 막힐 위험이 있으며, 아직 널리 응용되고 있지는 않고 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하는 방법으로 그림 5(b)와 같은 다열의 작은 막냉각

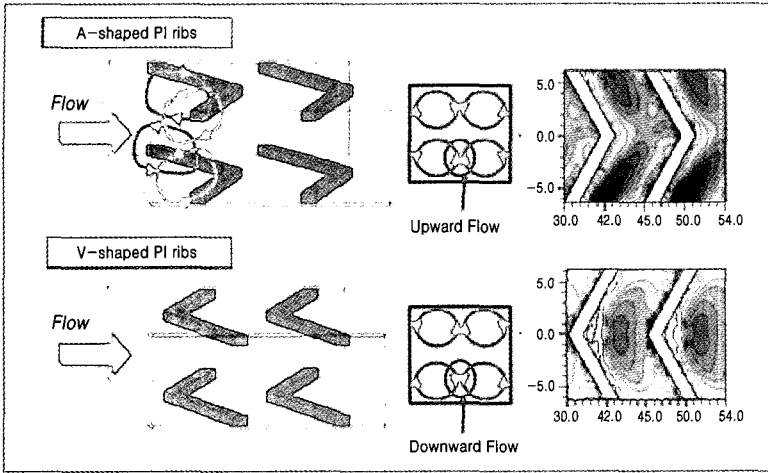


그림 7 요철배열에 대한 이차유동 및 열전달계수 분포

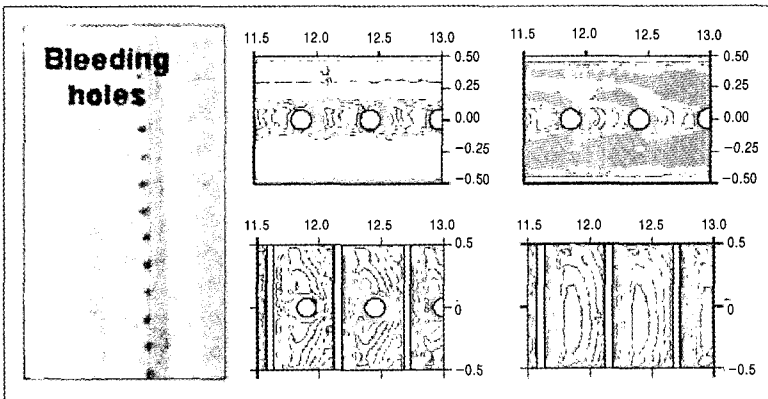


그림 8 막냉각 홀이 있는 내부관

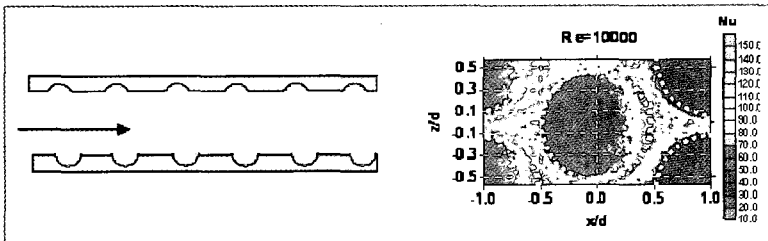


그림 9 딩플 주위에서의 유동특성

한 연구도 국내에서 꾸준히 수행 되어왔다. 그림 7은 요철 배열 및 형상에 따른 이차유동 구조 및 열전달계수 분포를 보여준다.

더욱이 터빈 블레이드의 경우, 고속으로 회전을 하기 때문에 회전하는 경우 냉각성능 평가가 필수적이다. 따라서 내부관이 회전

하는 경우 회전수, 요철 배열, 내부관 형상 등 여러 조건 변화에 따른 냉각성능 향상을 위한 연구 또한 꾸준히 이루어지고 있으며, 더 나아가 그림 8과 같이 내부관 냉각과 막냉각이 동시에 적용되는 경우에 내부관 내 유동유출에 따른 영향을 고찰하기 위한 연구가 진행되고 있다.

이 밖에도 최근에는 압력강하가 낮고 냉각성능이 뛰어난 딩플(dimple)을 내부관 냉각에 적용하는 것에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그림 9에 제시된 것과 같이 딩플은 요철과 유사하게 이차유동을 발생시켜 냉각성능을 향상시키는 반면 요철에 비해 압력강하가 적기 때문에 이에 대한 연구가 최근 국내·외 연구기관에서 진행 중에 있다.

충돌제트냉각 기술

충돌제트냉각은 대류냉각의 한 형태로, 냉각 공기의 흐름을 일련의 구멍을 통하여 고온 요소 내부 벽에 충돌시켜 냉각시키는 방식으로서, 그 활용범위가 매우 넓기 때문에 과거부터 꾸준히 연구되고 적용되어 왔다. 가스터빈엔진의 냉각에 있어서 충돌제트는 요구되는 부위에 국소적으로 매우 높은 냉각효과를 얻을 수 있기 때문에 베인 혹은 블레이드의 전연(leading edge)과 같이 열부하가 크게 작용하고 공간이 제한되는 부분에 주로 사용되어 왔

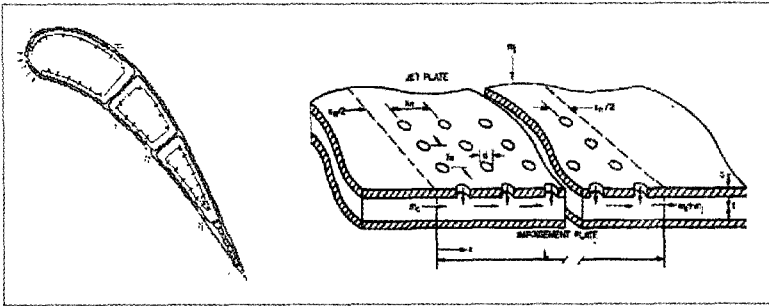


그림 10 총돌제트냉각이 적용되는 베인

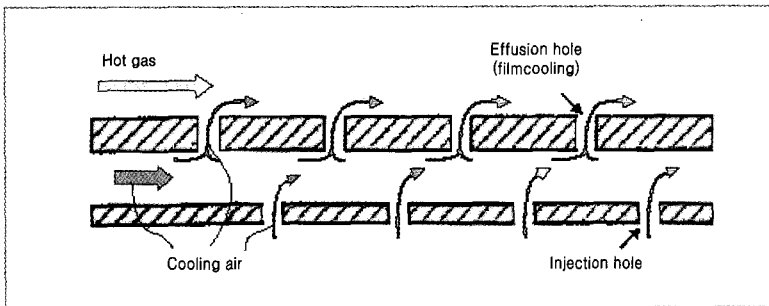


그림 11 총돌제트/유출냉각 개념도

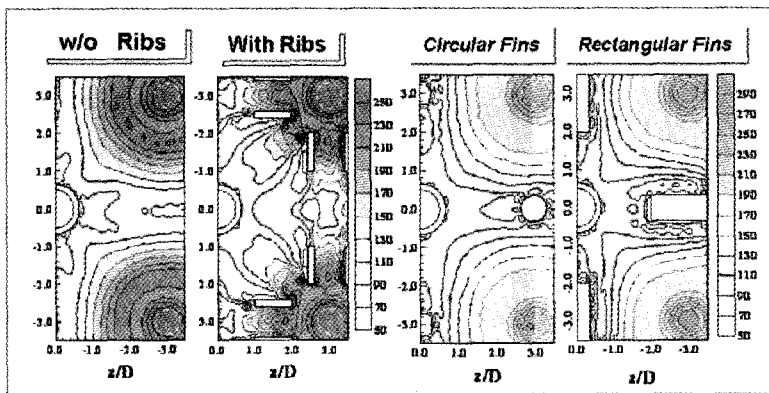


그림 12 요철 및 핀-핀이 적용된 총돌제트/유출냉각

으나, 최근 터빈입구온도의 상승으로 1단 베인의 경우 그림 10과 같이 전연면뿐만 아니라 압력면, 흡입면의 냉각에도 많이 적용되고 있다.

배열총돌제트의 경우 배열 정

열방법, 간격, 분사속도 등을 변화시키면서 분사 제트간의 상호작용이 총돌면 열전달에 미치는 영향이 다르기 때문에 이에 대하여 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며, 열부하가 큰 전연(leading

edge)에 많이 사용되기 때문에 총돌면의 곡률변화 효과에 대한 연구 또한 수행되어 왔다.

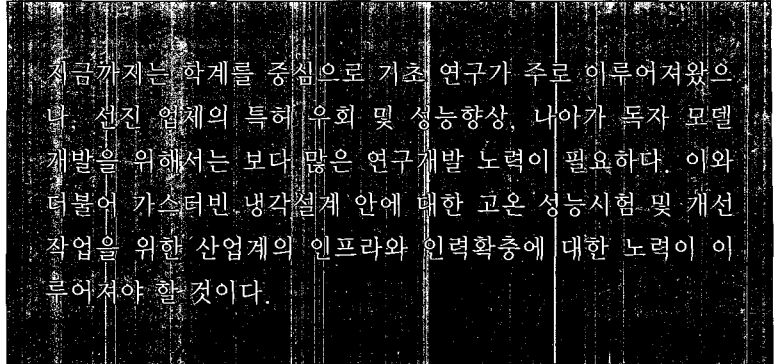
최근에는 배열총돌제트에 대한 연구뿐만 아니라 이들 냉각방법을 복합적으로 적용하는 복합냉각방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, 총돌제트냉각과 막냉각방법이 복합적으로 적용되는 총돌제트/유출냉각방법(그림 11), 총돌면에 요철 혹은 핀-핀을 설치하여 냉각효과를 증대시키는 방법 등에 대한 연구가 진행 중이다. 그림 12에서와 같이 총돌제트/유출냉각에 요철 혹은 핀-핀이 적용되는 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 보다 균일하고 높은 냉각성능을 갖는 것을 알 수 있다. 이처럼, 각각의 독립적인 냉각방법을 복합적으로 적용하는 경우 보다 높은 냉각성능을 얻을 수 있으므로 이에 대한 연구를 활발히 진행 중에 있다.

관련 기술 국내 연구 개발 동향

가스터빈엔진의 냉각과 관련된 연구는 1970년대 이후 미국을 비롯하여, 유럽 등 여러 나라에서 다양한 분야에 대해서 활발하게 이루어져 왔다. 이러한 연구 활동은 발전용 대형가스터빈을 비롯하여 항공용, 산업용 가스터빈의 개발 및 성능 향상으로 이어져오고 있다. 국내에서도 1980년대

이후 학계를 중심으로 가스터빈 냉각에 대한 기초연구가 이루어지고 있으며, '90년대 이후 산업계에서도 소형 가스터빈 개발 및 대형 가스터빈 부품개발을 위한 연구가 진행되고 있다.

소형 가스터빈엔진 개발과 관련해서는 한국항공우주연구원, 한국기계연구원 등 국책연구소와 삼성테크원을 비롯한 몇몇 기업이 연구과제를 수행해 왔거나 수행 중에 있고, 최근에는 두산중공업에서 소형 발전용 5MW급 가스터빈 개발하고 있다. 또한, 발전용 대형 가스터빈엔진의 고온부 부품개발을 위한 연구가 몇몇 업체 및 연구소를 중심으로 진행



지금까지는 학계를 중심으로 기초 연구가 주로 이루어져왔으나, 선진 업체의 특허 우회 및 성능향상, 나아가 독자 모델 개발을 위해서는 보다 많은 연구개발 노력이 필요하다. 이와 더불어 가스터빈 냉각설계 안에 대한 고온 성능시험 및 개선 작업을 위한 산업계의 인프라와 인력확충에 대한 노력이 이루어져야 할 것이다.

되었거나 진행 중에 있다.

학계에서는 연세대학교, 서울대학교 등 몇몇 대학에서 가스터빈 열전달 및 냉각기술인 막냉각, 충돌제트냉각 및 내부관 냉각과 복합냉각방법에 대한 여러 연구를

수행하여 기초적인 설계 데이터를 축적해오고 있다. 그 중 일부 내부관 냉각 관련 연구결과들은 대형 가스터빈 부품 국산화를 위한 설계 자료로서 활용되었다.

기계용어해설

질화갈륨(GaN)

질화갈륨은 비교적 최근에 주목을 크게 받게 된 III-V 화합물 반도체로서 특히 청자색 및 자외선 영역에서 동작하는 반도체 레이저 및 발광 다이오드(LED) 소자의 재료로 이용되고 있다. 청·녹색발광소자(light emitting diode) 및 광 검출기 등의 광학소자 제조에 이용된다.

차폐도(Coverage)

테라스의 박막 두께와 트렌치의 박막 두께의 비로서 계단차폐도는 테라스 위의 박막 두께에 대한 트렌치 수직면의 얇아진 최소 박막 두께를 나타내고, 바닥면 차폐도는 트렌치 바닥면에서의 증착 두께와 트렌치 높이의 비를 뜻한다.

미시형태모델(Feature Scale Model)

기판의 패턴 위에 증착하는 형상에 대한 고찰을 알아보기 위해 아주 세밀한 단위로 확대한 형태로서 특히 대부분 사각으로 고안된 패턴의 수평 및 수직 벽면 위에 증착하는 박막은 그 두께 및 구조가 상이하게 형성되어 증착 형상에 대한 미시적인 고찰이 요구된다.

좁은 갭 이론(Narrow Gap Theory)

좁은 유로를 지나는 음향파의 파장은 유로의 단면의 치수보다 크기 때문에 음향파는 일차원적인 것으로 가정할 수 있다. 이러한 좁고 긴 유로에서 음향파를 일차원으로 가정하는 이론은 좁은 갭 이론(narrow gap theory)으로 알려져 있으며, 음파의 진행방향과 동일 방향과 다른 방향 성분을 분리하여 해석한다.