

특집 : 조명설비의 신기술

광 파이프 조명기술 현황

한 수 빈 <한국에너지기술연구원 책임연구원>
정 학 근 <한국에너지기술연구원 연구원>

1. 서 론

최근에 무전극 형광등이나 sulfur lamp를 비롯한 신광원들의 등장과 고휘도 LED를 비롯한 반도체광원의 활성화로 조명분야의 산업과 시장에서 새로운 변혁이 예고되고 있다. 이들과 관련하여 광파이프, 특히 공동형 광전송장치(hollow light guide)를 이용한 광전송 및 배광기술이 또한 우리의 주변에 가깝게 접근하고 있다. 특히 프리즘을 기본구성 재료로 이용한 새로운 방식의 광파이프 기술이 개발됨에 따라 기존의 광파이프의 낮은 광전송 효율을 높이고 광전송뿐만 아니라 배광 도구로서의 이용도 가능하게 됨에 따라 새로운 조명기구로서 유용성이 커지게 되었다. 본고는 이러한 광파이프 기술을 현 시점에서 정리하여 기술의 이해와 향후 이 기술에 대한 접근이 수월할 수 있도록 국내의 조명분야 관계자에 소

개하고자 한다. 우선 광전송의 그 동안의 방법을 정리하여 보고 프리즘 필립을 이용한 새로운 광파이프 기술을 소개하고 관련된 기술적 사항을 검토하고 그 응용에 대해 전망해 보기로 한다.

2. 광전송의 수단

물이나 진기, 가스등을 발생지로부터 멀리 떨어져 있는 장소까지 전송이 가능하게 됨에 따라 우리의 삶의 질이 혁신적으로 향상된 것은 주지의 사실이다. 마찬가지로 여러 편의성을 위해서 광원(당시나 현재나 가장 대표적인 광원은 태양)으로부터 멀리 떨어진 위치까지 빛을 옮기는 시도가 19세기초부터 고려되기도 하였는데 광전송에 대한 시도는 처음에 그림 1과 같이 거울을 이용하는 것이었다.

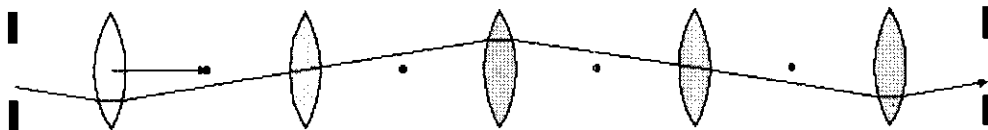


그림 1. 거울을 이용한 광전송 수단

거울을 튜브의 벽면에 설치하고 거울의 반사작용을 이용하여 빛을 이동시키고자 하였다. 이 때 광을 받아 처리할 수 있는 작은 렌즈 반경의 절반이하이며 평균적으로 95%에 불과한 금속 거울의 반사율 때문에 구 소련에서 많이 이용되기는 하였지만 상용화가 어려웠다.

현재까지 보편적인 광전송 도구로서는 광파이프(Light Pipe)가 이용되었으며 이는 말 그대로 광원으로부터 멀리 떨어진 곳까지 빛을 옮기는 파이프를 뜻하는 것으로 파이프 안에 물이나 기름대신 빛을 흐르게 한다는 개념이다. 광파이프로 광을 전송할 경우는 전송받는 곳은 광원의 과열, 폭발 등의 문제에서 벗어날 수 있으므로 안정성이 향상되고 광파이프로 배광까지 가능하다면 광원의 수가 줄어들며 조명시설의 유지보수 가격이 떨어지는 등의 장점이 있다. 물론 태양광을 광파이프로 이용할 수 있는 것은 광파이프가 처음 시도되었던 주 원인이기도 하다.

광파이프의 제조방식도 오랜동안 그림 2와 같이 메탈 튜브, 광덕트, 메탈 파이프/플라스틱 파이프, 광섬유 등이 다양하게 시도되었다. 이중 튜브/광덕트/광파이프는 처음 주광을 실내로 유입시키기 위해 플라스틱, 알루미늄 등의 정반사 재질로 구성되었고 광섬유에 비해 상대적으로 단가는 저렴하나 효율이 떨어진다.

광파이프를 주광에 이용할 경우 솔라(solar) 튜브라고도 하는데 북미의 주거공간과 상업공간에 이용되고 있다. 이용 방법은 주택지붕이나 건물외부에 설치되어 주광을 집광한 후 광파이프를 통해 실내공간으로 유입시킨다. 튜브의 지름 특성에 따라 이용 가능한 주광량이 변화되는데, 예를 들면 25[cm]의 제품이 약 300[W]의 백열등 밝기와 유사하며 13.5[m²]까지 영향을 미치고 광파이프 길이는 최고 10피트까지 가능하다. 전송된 광을 이용할 때는 출구에 주광의 휘도가 과도하지 않도록 플라스틱 렌즈 등을 통해 실내로 산란시킨다.

광섬유도 자외선, 적외선을 제외한 가시광선을 전송하는데 사용되고 빛이 광섬유 안에서 계속적인 반

사를 통해 전달되는 동안 손실이 발생되는데, 손실의 양은 광섬유의 질에 따라 좌우된다. 대략 길이 30[cm] 당 0.1~1[%] 정도의 손실이 발생되며 광섬유의 효율 향상을 위해서 광섬유 안에 센터 코어(center core)를 삽입하여 빛의 손실을 최소화하기도 한다. 광섬유의 종류는 재질에 따라 플라스틱과 유리 종류로 나뉘며, 산란방법에 있어서는 광섬유 측면으로 빛이 발산되는 것과 광섬유 끝에서만 산란되는 것이 있다. 산란 시에서는 출구에서 직접 산란하거나, 광학적 패널, 렌즈 등을 통해 실내공간으로 산란시킨다. 특히 고효율의 반사각을 이용하여 빛의 분산 각도를 정확히 제어할 수 있도록 하여 빛이 주광이 필요한 공간에 정확히 산란하도록 한다. 광섬유를 이용한 시도는 상당히 긍정적으로 평가되었으나, 신호 전달 및 표시등의 소량의 광신호가 아닌 조명용의 대량 광 운송에는 광섬유의 직경이 비약적으로 커져야 하고 이에 따른 무게와 비용이 광섬유의 응용을 비경제적인 것으로 만들었다.

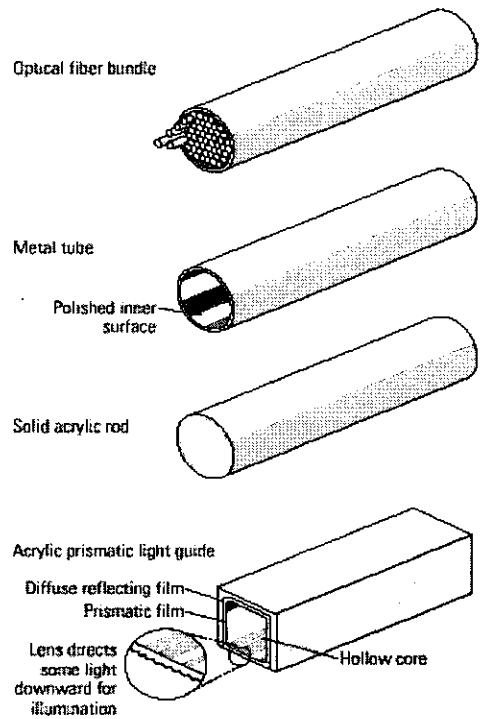


그림 2. 광전송용 광파이프의 종류

3. 광전송의 신재료인 Prismatic Film

기존의 광전송 수단에서 광파이프는 효율면에서 문제가 있고 광섬유는 조명용의 대량의 광 전송에는 비경제적이 되는 문제가 존재하였다. 이러한 문제를 해결하기 위한 시도로서 프리즘 효과를 이용한 빛의 이동수단이 개발되었다. 1981년 캐나다 UBC(University of British Columbia) 대학의 학생이었던 Lorne Whitehead가 프리즘 성질을 띤 재료가 빛의 이동수단이 될 수 있음을 파악하고 광전송용 프리즘을 개발하여 "Prism Light Guide"(PLG)로 특허 등록하였으며 1983년에는 캐나다 밴쿠버의 교외에 TIR System이라는 회사를 만들어 상용화에 나서게 되었다. PLG역시 다른 광파이프와 같이 처음에는 햇빛을 빌딩내부로 이동시켜 조명에 이용하고자 함이었으나, 곧 이 PLG가 보다 다양한 방면에 응용될 수 있음을 알게 되었다. 이후 UBC대학의 SSP(Structured Surface Physics) 실험실을 책임지면서 Whitehead 교수는 기존의 광파이프 방식보다 진일보한 프리즘 이용 광파이프(또는 광가이드)기술의 성능향상과 새로운 응용기구를 꾸준히 개발해오고 있다. 현재 3M에서만 판매되고 있는 핵심 요소기술인 Prism 필름은 Whitehead 교수의 특허를 허가 받아 생산되고 있는 것이다.

결국 광 운송재료의 개발은 비약적인 발전을 하였고 아크릴 패널 대신 얇은 필름을 이용하게 되었으며 이를 이용한 미세 프리즘 개발까지 이어졌다. 이러한 형태의 필름은 OLF(Optical Lighting Film)으로도 알려지게 되었고, 이러한 미세 프리즘을 필름 형태로 만들어 낸 목적은 단면설계에 있어 유연함을 제공함과 동시에 재료비를 절감하는 것이다. 재료로는 아크릴이나 폴리카보네이트 수지를 사용하는데 아크릴은 열악한 환경 하에서 좀 더 안정적인 반면, 폴리카보네이트 필름은 온도 특성이 우수하며, 두 가지 재료 모두 빛의 흡수량이 아주 작은 특성을 가지고 있어 광의 전송 재료로 적합하다.

따라서 Light Pipe의 핵심은 OLF에 있다고 해도 과언이 아니다. OLF는 미세 프리즘이 연속적으로 배열된 필름으로서 빛의 입사각에 따라 투명한 창이 되기도 하고, 거울이 되기도 하는 특성을 지니고 있다. 이때 반사가 되는 빛의 입사각은 27.6° 이내이고, 반사율은 99%에 이른다. 때문에 빛은 Light Pipe를 따라 매우 효율적으로 이동할 수 있다. 여기에 Extractor라는 필름을 Light Pipe 상단에 장착하게 되면 Light Pipe의 길이 방향으로 빛을 균일하게 방출할 수 있는 것이다.

4. 광파이프를 이용한 광전송 및 배광 원리

그림 3에서 보는 바와 같이 프리즘형 광파이프는 OLF를 이용하므로 내부는 매끄럽고 외부는 삼각형의 프리즘 형태로 원통형 또는 사각형으로 만들어진다.

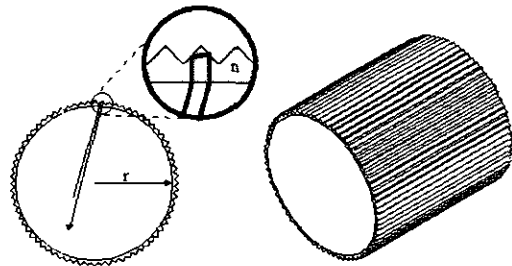


그림 3. Prism Light Guide

OLF는 미세 프리즘이 연속적으로 배열된 필름으로서 빛의 입사각에 따라 투명한 창이 되기도 하고, 거울이 되기도 하는 특성이 있어 필름의 반사특성에 따라 반사가 되는 빛의 입사각이 임계각 이내이면 반사율은 99%에 이른다. 때문에 빛은 광파이프를 따라 매우 효율적으로 이동할 수 있다. 즉, [그림 4]와 같이 임계각 이내의 광은 전반사 되고 이외의 빛은 투과하게 된다.

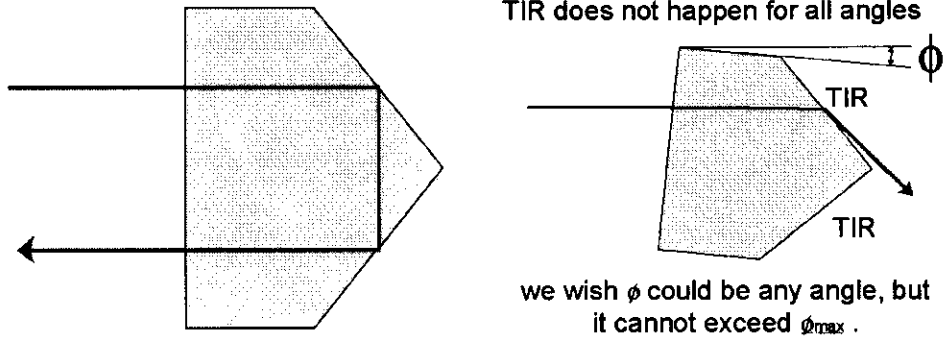


그림 4. Total Internal Reflection

임계각의 크기는 광파이프 물질의 굴절률에 의해 아래 식에 의해서 결정된다. 따라서 광파이프를 이용하여 광을 유효하게 전송하기 위해서는 광파이프에 임계각 이내의 빛이 입사되도록 하여야 함을 알 수 있다.

$$\theta_c = \arcsin \sqrt{(3 - 2\sqrt{2})(n^2 - 1)}$$

따라서 그림 5에서 보는 바와 같이 광파이프를 이용한 광전송 및 배광 시스템은 빛이 임계각 이내로 광파이프로 입사되도록 하는 광 변환기(Light Injector), 광파이프 뒷면으로 투과된 빛을 다시 광파이프로 유입시켜주는 반사갓(Reflective Cover) 그리고 빛이 투과되는 발광면(Emitting Area)로 구성된다.

일반적으로 임의의 광파이프 전송 및 배광 시스템을 광파이프의 길이(L) 혹은 길이와 광파이프 단면적(W_g)의 비를 이용하여 특징을 정의하려고 하는 것은 유용하지 못한 방법이다.

비슷한 길이 또는 길이와 단면적의 비를 가진 광파이프라 하더라도 그 특성은 완전히 달라지기 때문이다.

$$AR = \frac{L}{W_g}$$

따라서 광파이프 등기구의 특징을 규정하는 좋은 방법은 광파이프 내에서 평균적으로 반사되는 횟수(N_g)를 이용하는 것이다. 예를 들어 평균 반사수가 3보다 작다면 일반 반사체를 이용하여서도 충분히 광을 전송할 수 있으므로 프리즘형 광전송 장치는 필요 없을 것이다. 또한 평균 반사수가 30보다 크다면 프리즘형 광전송 장치를 이용하더라도 손실이 커서 유용하지 못할 것이다.

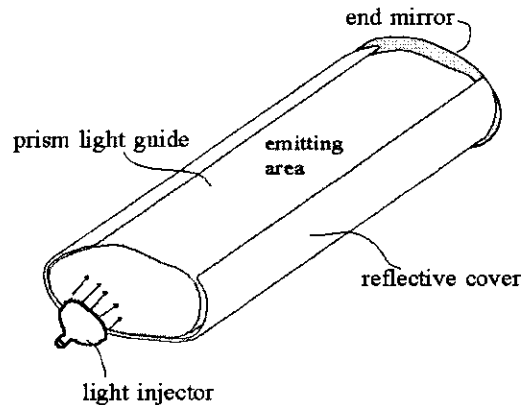


그림 5. The Prism Light Guide Luminaire

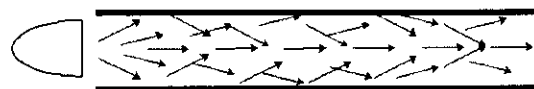


그림 6. The Reflection of Light Rays

광파이프에 입사한 광의 평균 반사수는 광파이프의 길이에 비례하고, 단면적에 반비례함을 직관적으로 짐작할 수 있으므로 아래 식과 같이 표현할 수 있다. 정확하게 평균 반사수를 구하기 위해서는 광의 입사각의 평균 탄젠트를 구함으로써 얻을 수 있을 것이다.

$$N_g \propto \frac{L}{W_g}$$

그러나 입사광의 평균 탄젠트를 구하는 것은 아주 힘든 작업이므로 광파이프 전송 및 배광을 처음으로 제안했던 White Head 교수는 광의 입사각($\theta_{1/2}$)을 이용하여 다음 식으로 근사화 하였다. 광파이프 설계 시 이 식을 이용하여 $6 \leq N_g \leq 24$ 의 조건을 만족하도록 단면적과 크기 및 광원을 선택하게 된다.

$$N_g \cong \frac{\theta_{1/2}}{50} \frac{L}{W_g}$$

광파이프 전송 및 배광에 있어서 또하나의 중요한 문제는 광파이프 발광면이 길이방향으로 일정하게 광분포를 가지도록 하는 문제이다. 그림 5과 같이 구성된 프리즘 광파이프는 임계각 이내로 광이 입사된다면 발광면을 통해서 나오는 빛은 거의 없다고 할 수 있다. 원하는 배광을 위해서는 발광면 반대편에 그림 7와 같이 광추출기(Extractor)가 설치되어야 한다. 광추출기는 빛을 완전 확산시키는 물질로 임계각 이내로 입사되어 전반사되고 있는 빛을 산란시켜 임계각을 벗어나는 광을 유도해 발광면을 통하여 빛이 투과하도록 하는 작용을 한다.

따라서 광추출기의 길이방향에 따른 크기에 따라 광파이프 발광면의 배광 형태가 달라진다. 즉 광파이프를 이용한 조명에 있어서 원하는 배광 형태에 따라 광추출기를 다르게 설계함으로써 그 목적을 달성할 수 있게 된다.

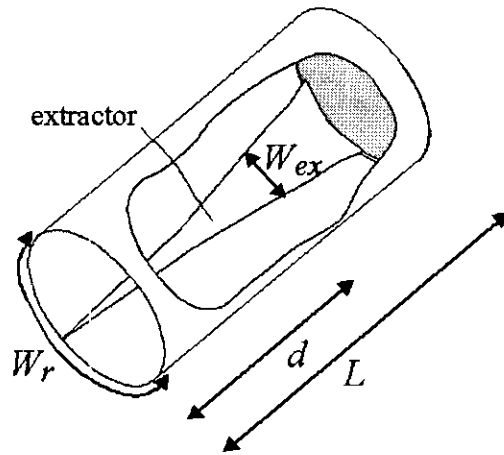


그림 7. Extractor Width

5. 광파이프 시스템의 응용과 장치

현재 광파이프는 매우 여러 응용에서 사용되고 있는데 화재 위험성이 높은 곳, 높은 천장을 갖는 장소, 산업용 프랜트, 터널 및 도로 조명등 유지보수가 어렵고 비싼 곳 그리고 건물에 주광을 이용하려고 하는 용도에 사용된다. 예전에는 광파이프의 실제 낮은 효율이 문제로 이는 낮은 표면의 반사율에 기인하였지만 내부반사 99[%]인 Optical lighting film(OLF)를 사용하여 최근에는 전반적인 실내 및 옥외용에 대해 광파이프에 대한 관심이 높아지고 있고 이것의 사용으로 전기적인 설치가 간편해지면서 보다 높은 수준의 시환경이 제공되고 있어 건물의 경관 조명용에도 큰 수요가 기대되고 있다.

광전송 장치의 개발 및 판매에 있어서는 캐나다의 TIR사가 선도하고 있으며 3M에서 생산하고 있는 OLF라는 프리즘 필름을 사용하고 독자적인 등기구의 크기 및 형태를 설계하여 광전송 시스템을 제공하고 있다. 이 회사에서 현재 판매 또는 개발중인 광전송장치는 다음과 같다.

가. 형태 및 크기

주로 단면이 원형이며 이론적으로는 사각형도 가

능하나 제조상의 용이함과 사용상의 선호도면에서 원형이 앞서고 있는 것 같다. 원형의 경우 4"(101mm), 6"(152mm), 8"(200mm), 12"(304mm)의 직경의 크기로 제작되고 있다.

나. 광이송 형태

(1) Single Endfeed 형태가 있으며 이는 광파이프 한쪽 끝에서 광원이 연결되어 있고다른 끝은 거울등 반사체로 구성된다.

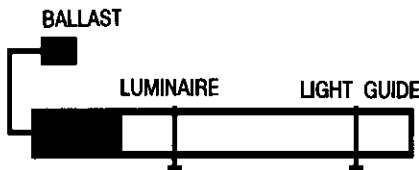


그림 8. Single Endfeed 형태의 광파이프

(2) Dual Endfeed 형태는 광파이프 양쪽에서 광원이 연결되므로 보다 긴 공간을 조명하는데 사용된다.

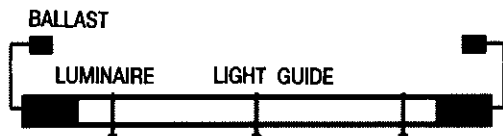


그림 9. Dual Endfeed 형태의 광파이프

(3) Midfeed 형태는 광원이 광파이프 중간에 연결되어 광파이프 양쪽 끝으로 광을 전달하는데 사용된다.

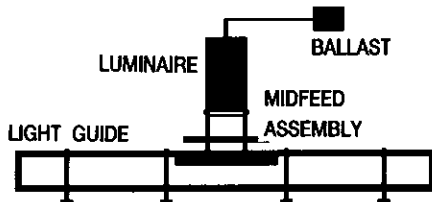


그림 10. Midfeed 형태의 광파이프

(4) Double-Ended 형태는 한 개의 광원이 두 개의 독립적인 광파이프를 양쪽으로 동시에 연결하여

사용한다.

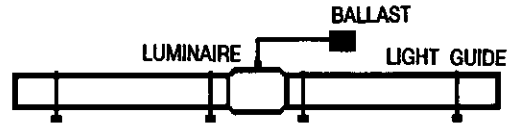


그림 11. Double-Ended 형태의 광파이프

다. 광파이프 길이

통산 3m 단위의 모듈로 생산되고 있으며 광파이프 구조에 따라 다르나 최고 1kW급 램프에 대해서 Single Endfeed형태의 경우 18m까지 제조되고 있다.

라. 광파이프 방사 각도

광파이프의 방사 각도는 90도, 100도, 120도, 180도, 240도의 방사 각도로 다양하게 제조되고 있다.

마. 사용 램프

현재 사용램프는 고압나트륨등, 메탈할라이드등이 사용되고 있으며 현재 Fusion lighting사의 경우 sulfur lamp가 제출시되면 역시 사용이 가능할 것으로 보인다. 사용 용량은 250[W], 450[W], 1[kW]급으로 판매되고 있다.

바. 시스템 구성

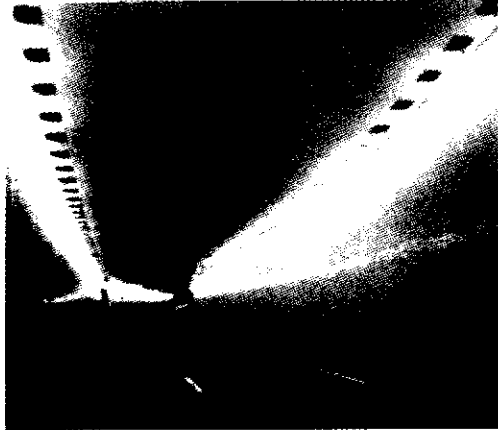
광파이프 시스템은 광원, 광원의 반사갓, 광파이프, 광원과 광파이프 사이에 연결하기 위한 입력 endcap 및 band clamp로 구성되고 있다.

사. 가격

시스템 종합적인 면에서 볼 때 1kW급 300[mm] 직경의 시스템의 경우 약 80[만원/m]로 고가이다.

아. 대표적 응용 사례

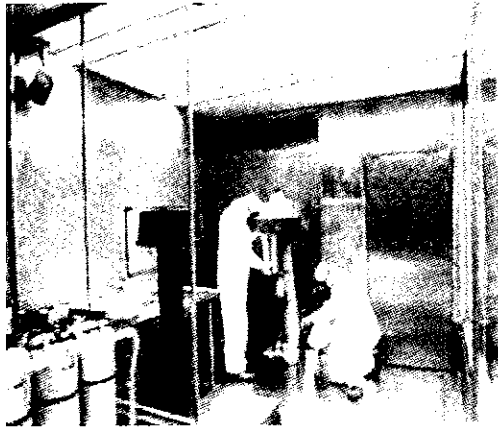
광파이프 조명은 원격조명과 고취도 광원을 이용할 수 있는 장점으로 높은 천장의 넓은 공간 조명(공연장, 비행기 격납고, 창고, 터널 등), 폭발위험이 있



Bridge Tunnel



미네폴리스 수영장



위험한 연구시설



쇼핑센터의 back lighting

그림 12. 광파이프 조명 응용 사례

는 환경하의 조명(화학공장, 광산, 군수품 창고 등), 열 및 오염물질의 유입이 없어야 하는 조명(수술실, 실험실, 클린룸 등), UV에 의한 피해가 예상되는 곳(박물관 전시물, 화랑, 수족관, 쇼펩몰 등), 광고, 장식용 조명, 장시간 작업이 진행되는 곳 그리고 부드러움과 안락함이 요구되는 조명(응급구조 차량의 내부조명실내, 스포츠 시설 등) 등과 같은 여러 분야에 응용된다. 그림 12는 광파이프 조명의 장점을 이용하여 실제 이용되고 있는 장소들이다.

6. 결 론

최근의 프리즘 필름을 이용한 광파이프는 종래의 여러 광파이프와는 달리 광을 전송하면서 광파이프 자체가 배광용 등기구로 작용한다는 점에서, 또한 내부 반사율을 99%이상 유지한다는 점에서 다양하고도 새로운 응용이 가능하게 되었다. 그러나 현재 대중에게 쉽게 접근하고 원활한 보급이 되기에는 시스템 가격이 매우 고가인 것이 문제로 결국 광파이프

연구에서 중요한 것은 시스템 가격의 저렴화와 시스템 자체의 효율을 높이는 것이 된다. 이 부분에서는 현재 획기적인 변화가 단기간에는 쉽지 않을 것으로 보이나 일단 광원의 반사각 설계와 광원과 광파이프와의 인터페이스시의 광손실을 최대한 줄이고 광프리즘 필름을 저가로 대량생산 할 수 있는 기술이 요구된다. 이와 관련하여 OLP 필름의 개발자인 Whitehead교수의 견해로는 광파이프 필름의 가격은 현재의 가격에서 1/5-1/10까지는 떨어질 수 있을 것으로 예측하고 있다.

앞으로 관련 연구의 다른 추세는 광파이프의 다양한 형태의 변화로 실제 적용시 응용을 확대하는 것이며 또 하나는 태양광의 집광용 등기구를 광파이프와 직접 연결시키는 것이다. 여기에서는 집광용 등기구 자체를 광파이프와 같은 프리즘 필름기술로 구현하고 이를 등기구에 연결시키고 또한 태양광과 인공광원을 복합하여 조명을 실현하는 것이다. 그 밖에 광파이프로 색을 갖는 광을 전송 및 배광하는 것도 상업화가 시도되고 있으며 이는 건물, 다리, 이벤트 행사장 등의 장식용 조명으로 사용될 것으로 현재 광원으로는 LED 주로 사용하고 있다.

이렇게 다양한 응용이 시도되고 산업발전과 경제력이 향상되면서 높은 수준의 조명을 요구하는 추세에 따라 조만간 광파이프 기술과 제품은 우리에게 보다 가까이 접근하게 될 것으로 보이며 또한 새로운 시장을 창출하게 되는 기회의 장을 열게 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Whitehead, L.A., Prism Light Guide Luminaire US patent #4,750,798, October 7, 1986.
- [2] A. Zastrow, V. Wimer: Daylighting with mirror light pipes and with fluorescent planar concentrators, Proc. SPIE 692 227(1987)
- [3] P. D. Swift, G. B. Smith, Cylindrical Mirror Light Pipes, Solar Energy Materials and Solar Cell 36, 1995.

- [4] Hong Ma, 1999, The roller blindheliostat, Engineering physics project Laboratory Project #9906.
- [5] N. Baker, A. Fanchiotti, K. Steemers, 1993, Daylightin in architecture a european reference book, pp. 4.1-4.18.
- [6] Whitehead, L. A. and Hoffmann, K., 1998, Method for Estimation the efficiency of prism light guide luminaires, paper #11.
- [7] Whitehead, L. et al., 1999, Hollow light guide technology and applications.

◇ 著 者 紹 介 ◇



한 수 빈(韓秀彬)

1977년 한양대학교 전자공학과(학사). 1986년 한국과학기술원 전기및전자공학과(석사). 1997년 한국과학기술원 전기및전자공학과(박사). 현재 한국에너지기술연구원 책임연구원/전기조명기술연구센터장.



정 학 근(鄭學勤)

1996년 전남대학교 전기공학과(학사). 1998년 광주과학기술원 기전공학과(석사). 현재 한국에너지기술연구원 연구원.