



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

고밀도 태양광의 복합 이용을 위한
자연채광 시뮬레이션 및
열음향 레이저 개발

濟州大學校 大學院

에너지 工學科

吳元鍾

2011年 2月

고밀도 태양광의 복합 이용을 위한
자연채광 시뮬레이션 및
열음향 레이저 개발

指導教授 千 院 基

吳 元 鍾

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2011年 2月

吳元鍾의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李 潤 俊 (印)

委 員 金 南 鎭 (印)

委 員 千 院 基 (印)

濟州大學校 大學院

2011年 2月

Daylighting Simulation and Thermoacoustic Laser
Development for the Enhanced Utilization
of Highly Concentrated Solar Radiation

Won Jong Oh
(Supervised by Professor Wongee Chun)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2011. 2.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis Director, Wongee Chun, Prof. of Nuclear and Energy Engineering
.....
.....
.....

.....
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vii
SUMMARY	viii
I. 서 론	1
1. 광 파이프 이용한 자연채광 시뮬레이션	1
2. 열음향 레이저(Thermoacoustic Laser)의 개발	3
II. 이론적 배경	5
1. 자연채광 시뮬레이션	5
1.1 광 에너지의 단위	5
1.2 자연채광 시스템(Daylighting System)	7
1.3 시뮬레이션 프로그램	11
2. 열음향 레이저의 개발	14
2.1 횡파와 종파	14
2.2 주기적 파동(Periodic wave)	14
2.3 정상음파(Standing wave)	17
2.4 한쪽 면이 닫힌 튜브의 진동수	18
2.5 음향파(소리)의 발생	20
2.6 파동방정식(Wave Equation)	21

III. 광 파이프 시뮬레이션	24
1. 모델링 및 시뮬레이션	24
2. 결과 및 고찰	28
2.1 광 파이프의 기본 성능 시뮬레이션	28
2.2 광 파이프의 최적화 시뮬레이션	31
3. 소결론	38
IV. 열음향 레이저의 개발	40
1. 실험 장치 및 방법	40
1.1 실험 장치	40
1.2 실험 방법	47
2. 결과 및 고찰	49
2.1 스택의 위치에 따른 음향파 분석	49
2.2 스택의 위치에 따른 음향파 분석	54
2.3 스택의 위치에 따른 음향파 분석	59
2.4 튜브의 길이에 따른 음향파 분석	64
3. 소결론	68
V. 결 론	69
참 고 문 헌	70

감사의 글

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Sun pipe system;	
(a) Schematic of sun pipe system	
(b) Photograph of sun pipe system	8
Fig. 2. Lens-optical fiber system;	
(a) Schematic of lens-optical fiber system	
(b) Photograph of Himawari solar lighting system	9
Fig. 3. Mirror-optical fiber system;	
(a) Schematic of mirror-optical fiber system	
(b) Photograph of mirror-optical fiber system	10
Fig. 4. Mirror heliostat system;	
(a) Schematic of mirror heliostat system	
(b) Photograph of mirror heliostat system	10
Fig. 5. Examples of ECOTECT analysis;	
(a) Distribution of annual insolation in 3D modeling	
(b) Analysis of interior illuminance distribution	12
Fig. 6. Examples of RADIANCE analysis;	
(a) Illuminance (b) Luminance	13
Fig. 7. Direction of wave movement;	
(a) Transverse wave (b) Longitudinal wave	14
Fig. 8. Periodic wave;	
(a) Transverse wave (b) Longitudinal wave	15
Fig. 9. Standing wave in a tube;	
N : Displacement node(Pressure antinode),	
A : Displacement antinode(Pressure node)	18
Fig. 10. Pattern of standing waves in a tube with one open end;	
(a) 1st mode (b) 2nd mode	
(c) 3rd mode (d) 4th mode	19

Fig. 11. Modeling by ECOTECT; (a) Top view (b) Side view (c) Isometric view (d) 3D sectional view	25
Fig. 12. A sun pipe system for simulation	27
Fig. 13. Measurement points on floor for analyzing illuminance	27
Fig. 14. Illuminance distribution of lightless space without any sun pipe system; (a) Illuminance(lux) (b) Isolux lines	28
Fig. 15. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system (without diffuser); (a) Illuminance(lux) (b) Isolux lines	29
Fig. 16. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system (with diffuser); (a) Illuminance(lux) (b) Isolux lines	30
Fig. 17. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system of 0.6m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m	31
Fig. 18. Isolux lines of lightless space with a sun pipe system of 0.6m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m	32
Fig. 19. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system of 0.8m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m	33
Fig. 20. Isolux lines of lightless space with a sun pipe system of 0.8m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m	34
Fig. 21. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system of 1.0m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m	35
Fig. 22. Isolux lines of lightless space with a sun pipe system of 1.0m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m	36

Fig. 23. Average illuminance variation with diameter and length of a sun pipe system	37
Fig. 24. Thermoacoustic laser(TAL) system	40
Fig. 25. Photograph of a stack	41
Fig. 26. Photograph of a resonance tube	42
Fig. 27. Acoustic analyzer for measuring characteristics of acoustic waves	43
Fig. 28. Photograph of data logger(34970A)	45
Fig. 29. Photograph of power supply	46
Fig. 30. Schematic of thermoacoustic laser system	47
Fig. 31. Maximum and average SPL with stack position	49
Fig. 32. Maximum temperature with stack position (three minutes after supplying power)	50
Fig. 33. Onset time of acoustic waves with stack position	51
Fig. 34. Onset temperature of acoustic waves with stack position	52
Fig. 35. Temperature gradient and SPL of generated acoustic wave (stack position: 5cm from closed end)	53
Fig. 36. Temperature variation of heating end of stack with different stack lengths	55
Fig. 37. Variation of temperature gradient with different stack lengths	55
Fig. 38. Temperature variation of cooling end of stack with different stack lengths	56
Fig. 39. Maximum and SPL of acoustic waves with different stack lengths	57
Fig. 40. Temperature gradient and SPL of generated acoustic wave with stack length of 12.6mm	58
Fig. 41. Temperature gradient and SPL of acoustic wave with stack length of 25.6mm	58

Fig. 42. Temperature variation of heating end of stack with different input powers	59
Fig. 43. Variation of temperature gradient with different input powers	60
Fig. 44. Maximum and average SPL of acoustic waves with input power	60
Fig. 45. Onset time of acoustic waves with input power	61
Fig. 46. Temperature gradient and SPL of acoustic wave with input power of 25W	62
Fig. 47. Temperature gradient and SPL of acoustic wave with input power of 30W	63
Fig. 48. Temperature gradient and SPL of acoustic wave with input power of 35W	63
Fig. 49. Sound pressure level of acoustic waves with different lengths of resonance tube and stack position	64
Fig. 50. Maximum and average SPL of acoustic waves with different lengths of resonance tube (stack position: 5cm from closed end)	65
Fig. 51. Variation of temperature gradient with different lengths of resonance tube	66
Fig. 52. Temperature variation of heating end of stack with different lengths of resonance tube	66
Fig. 53. Frequencies measured with different lengths of resonance tube (a) 150mm (b) 200mm (c) 250mm	67

LIST OF TABLES

Table 1. Luminous flux of general light sources	5
Table 2. Conditions of the sun pipe components used in the present modeling	26
Table 3. Specification of acoustic analyzer	44
Table 4. Experimental conditions to find the optimum design (geometric)	47



SUMMARY

Solar energy has been used in various fields, because it is clean and reliable. The present study explored the use of sunlight in two important areas which make it competitive and also attractive. First, we carried out a series of computer simulations for using sun pipes to introduce sunlight into the interior of a building. The focus was made onto the enhancement of visual environment when natural daylight is delivered to a classroom. While daylighting provides efficient means to harness the sun's abundant energy, it still leaves much room for further exploitation. With the aid of simple optical devices, sunlight could be easily concentrated and utilized. Solar-powered Thermo Acoustic(TA) lasers make one of these applications, which we explored as the other important area of solar utilization.

1) Daylighting simulation

A lightless space with the dimension of a typical classroom at Jeju National University was modeled by ECOTECH. Two different cases were simulated and analyzed by RADIANCE. In the first case, a comparative analysis of illuminance was carried out to estimate the basic performance of sun pipe systems. In the other case, different designs of sun pipe systems were analyzed to elicit the most efficient model of operation. Simulations were performed for solar noon which indicates the time (or point) in the sun's path at which the sun is on the local meridian. Results show that indoor visual environment could be greatly enhanced with the application of sun pipe systems. The maximum illuminance took place with the sun pipe system of 1.0m in diameter and 0.5m in height.

2) Thermo-Acoustic Laser(TAL) development

A series of experiments were carried out to find the most optimum operating conditions for the maximum SPL(Sound Pressure Level) and frequency of the acoustic waves generated by ThermoAcoustic(TA) lasers.

Among various experimental variables, we focused our research on the stack position, stack length, length of the resonance tube and input power. Based on the experimental results, we obtained the following for the most optimum operating conditions:

- (i) stack position : 5cm from the closed end of the resonance tube
- (ii) stack length : 25.6mm
- (iii) input power : 35W
- (iv) tube length : 150mm



I. 서 론

청정에너지 기술 중 안정성과 신뢰성이 높은 태양에너지 이용 기술은 현재 태양광 발전이나 태양열 급탕 등에 다양하게 활용되고 있다. 본 연구에서는 태양광의 선택적 적용이 가능한 복합 시스템을 개발하여 태양에너지 적용시스템에 대한 공간적 제약을 해소하고 효율성을 향상시키는 것이 최종 목표이다. 이는 기존에 전기에너지가 담당하고 있는 부하를 태양에너지를 활용해 효율적으로 해결할 수 있도록 함으로써 CO₂의 저감은 물론 자연에너지원으로서 태양광의 이용을 극대화시켜 상당한 경제적 및 사회적 파급효과를 가져올 것으로 기대된다.

본 연구에서는 태양에너지의 복합 이용을 위하여 자연채광 시스템 중 광 파이프에 대한 시뮬레이션 및 최적의 열음향 레이어 개발과 관련한 내용을 중점적으로 다루고 있다.

1. 광 파이프를 이용한 자연채광 시뮬레이션

최근 생태학적인 건축 및 지속가능한 건축의 중요성이 증대되면서 건축에서도 자연광을 이용하려는 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 자연채광시스템은 자연광의 유입이 불가능하거나 부족한 실내 공간에 다양한 하드웨어를 이용하여 자연광을 도입시키는 시스템으로 에너지 절약효과 뿐 아니라 향상된 시환경을 제공한다.

자연채광시스템은 자연광을 집광하는 채광부, 집광된 빛을 전달하는 전송부, 전송된 빛을 실내에 조사시키는 산광부의 3부분으로 구성된다. 이때 자연광을 집광하기 위하여 태양추적장치를 사용하기도 한다. 자연광은 실에 유입되는 빛의 입사량에 따라 시각적 편안함을 주기도 하지만 직사광에 의한 글레어를 발생시키기도 한다. 따라서 자연채광시스템 설계에 있어서는 직사광을 최소화하고 실내의 균제도가 최대화 되도록 고려해야 한다. 건물의 인공조명의 필요성을 최소화하기 위해서는 자연 채광의 효율적인 사용이 요구된다. 자연채광이 잘 설계된 건물은 일광의 증가 수준에 따라 최대 70%까지 전기 조명 부하를 줄일 수 있다.

그 동안은 전기를 이용한 전구, 태양 추적 장치 등 고가의 장비를 이용한 광원을 사용하여 왔다. 그러나 최근에는 패시브(Passive)한 광 파이프 시스템에 대한 연구가 중점적으로 진행되고 있다. 패시브형 광 파이프 시스템은 광섬유나 태양추적장치와 원리는 유사하나 단순성과 저가의 장비라는 장점을 가지고 있다[Joel Callow, 2003].

친환경 설계는 이제 모든 건물의 필수요소이다. 건물의 친환경 전략 혹은 에너지 절약 설계 방안 없이는 건축주, 사용자의 요구, 친환경 기준 및 정부 규제 등에 따라갈 수 없다. 그리고 정확한 친환경적 분석을 통한 디자인이 쉽지 않은 것이 현실이다. 초기 설계단계의 중요성에도 불구하고 제대로 된 에너지 및 건물 성능 평가는 이루어지기 쉽지 않으며, 부족한 친환경 분석 내용으로 단지 보기 좋은 이미지 혹은 다이어그램으로 중요한 친환경적 개념을 대변하고 있는 경우도 종종 발생한다[고동환, 2010].

본 연구에서는 자연채광 시스템 중 패시브형 광 파이프 시스템을 시뮬레이션하여 분석하였다. ECOTECT 프로그램으로 무창 공간과 광 파이프를 모델링만 하였는데, 이는 ECOTECT는 기본 알고리즘에서 굴절을 구현할 수 없기 때문에 광 파이프의 구성장치인 Diffuser에 의한 빛 산란이 불가능하다. 따라서 RADIANCE를 연동하여 광 파이프의 기본 성능을 분석하였고, 광 파이프의 직경과 높이를 달리하여 최적의 광 파이프 형상을 찾기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 열음향 레이저(Thermoacoustic Laser)의 개발

열음향(Thermoacoustic)이란 열역학(Thermoacoustics)과 음향학(Acoustics)을 합친 단어로써 열전달의 메커니즘에 의해 음향파(소리)가 발생하는 것을 의미한다. 열음향은 획기적인 에너지 변환 방법으로써 기존의 변환 방법에 비해 펌프, 벨브, 컴프레서와 같은 기계장치가 없기 때문에 신뢰도가 높고, 유지비용이 적으며 제작비용도 상대적으로 낮다. 무독성, 환경적으로 친숙한 작동 유체를 사용하고 태양열, 폐열 등 주변에 산재해 있는 다양한 열원으로 그 활용이 가능하여 청정에너지 기술이라고 할 수 있다. 음향파의 진폭은 포커싱(Constructive interference) 되어 매우 높아질 수 있으며 압축파처럼 충격을 발생시킨다. 전기적인 생성에 의한 스파크를 동반하는 충격파는 석탄의 분쇄, 종양을 파괴하고 신장 결석을 제거하는 등의 다양한 의학적 적용에도 활용된다. 그리고 음향파로 주파수를 초음파 범위까지 증가 시키면 현재 초음파가 적용되는 분야를 대체할 수 있으며 압전소자, 선형 교류 발전기(Linear alternator) 등의 음향전원 변환기(Electroacoustic power transducer)를 적용할 경우 전기도 생산할 수 있다[O. G. Symko, 2007].

열음향 현상은 이미 두 세기에 걸쳐 연구되어 왔으나 일반인에게 잘 알려지지 않는 않았다. 1956년 Putnam과 Dennis는 그들의 해설논문에서 1777년에 이루어진 Higgins의 실험을 소개하였다. 그 내용은 양끝이 개방된 큰 원통 내의 적절한 위치에 놓인 수소 불꽃이 음파를 발생시킨다는 것이다.

가장 잘 알려진 열음향 기관은 1850년에 소개된 Sondhauss 튜브와 1859년에 소개된 Rijke 튜브이다. Sondhauss 튜브는 한쪽 끝이 닫히고 한쪽 끝이 열린 튜브이며, Rijke 튜브는 양쪽 끝이 열린 튜브이다. Sondhauss는 유리세공에서 뜨거운 유리구가 차가운 유리관에 접촉할 때 이따금씩 유리관의 끝에서 발생하는 소리에 대해 음파의 주파수와 유리관의 크기에 따른 상관관계를 정량적으로 조사하였다. 1896년 Rayleigh는 Sondhauss 관의 현상을 정성적으로 해석하였고, 그의 정성적 해석은 옳았으나 이에 대한 올바른 정량적 해석은 지금으로부터 반세기 전쯤에야 비로소 이루어졌다[Rayleigh, 1945].

현대 열음향 실험 분야에서 획기적인 진전을 가져온 것은 1962년 Carter에 의해 이루어 졌다[Carter et al., 1962]. 이들은 관내에 적절한 구조물을 장착함으로써 Sondhauss 튜브의 효율을 증대시킬 수 있었으며 이러한 착상을 Feldman이 이어받아 600W의 열을 가해 27W의 음향파워를 발생시킬 수 있는 효율적인 Sondhauss 튜브를 제작하였다. 이러한 연구를 바탕으로 열음향 기관에 실용적 가치를 부여하게 되었으며 현재 열음향 장치는 제한된 영역에서만 시험적으로 사용되고 있지만 앞으로는 좀 더 많은 영역에서 실질적인 에너지 변환기로 사용될 것으로 기대되고 있다[윤석왕, 2003].

열음향파를 활용분야에 대해 분류하게 되면 크게 열음향 냉동기, 열음향 엔진, 열음향 레이저로 나눌 수 있다. 이전에는 주로 열음향 냉동기에 대한 연구가 국내·외적으로 다양하게 진행되어 왔으며, 최근에는 열음향 엔진, 열음향 레이저분야도 활발한 연구가 진행되고 있다. 최근에 새로이 개발된 열음향 레이저는 약한 전력을 통하여 수백만 kHz의 주파수를 갖는 음향파를 발생하게 하였다[Kent et al., 2006; Walker et al., 2009].

본 연구에서는 최종적으로 태양열 및 폐열을 열음향 레이저(TAL)에 적용하는 것이 목적이다. 하지만, 기존 연구 내용을 보면, 기하학적 형상이 본 연구에서 적용할 열음향 레이저와 다르고, 비슷한 구조의 튜브 일지라도 튜브 내의 압력 및 온도를 측정하는 현상 분석 위주의 실험이 주를 이뤘다[Kohei Hotta et al., 2009]. 그리고 기존 연구에서는 열음향 냉동기에 관한 연구가 대부분이며, 열음향 레이저에 관한 연구 및 실험은 이에 비해 부족한 상태이다. 따라서 태양에너지를 열원으로 적용하기에 앞서본 연구에서는 전원을 공급하여 열음향 레이저의 기하학적 형상에 따른 단일 튜브에서 발생하는 음향파의 기본 특성을 중점적으로 분석하였으며, 이를 통해 열음향 레이저 시스템의 최적 조건을 찾고자 하였다.

본 연구에서는 스택의 직경(공명튜브의 직경), 스택의 재질 및 형상을 고정 변수로 두고 스택의 위치, 길이, 공명 튜브의 길이, 그리고 공급전원을 달리하여 실험을 진행하였다. 스택 및 튜브의 직경은 20.2mm로 고정하였고, 스택은 0.81mm²의 넓이의 다수의 사각형 형상의 채널이 들어있는 ‘벌집모양(Honey comb)’ 세라믹 스택을 사용하였다.

II. 이론적 배경

1. 자연채광 시뮬레이션

1.1 광 에너지의 단위

1) 방사속

전자파로서 전달되는 에너지를 총칭하여 방사라고 하고, 단위시간에 어떤 면을 통과하는 방사에너지의 양을 방사속(Radiant flux: Φ)이라 한다. 단위는 와트(Watt; W)를 사용한다.

2) 광속

사람의 눈에 보이는 가시범위의 방사속을 광속(Luminous flux: F)이라 하며, 파장이 380~760nm사이인 방사속을 말한다. 단위는 루멘(Lumen: lm)을 사용한다.

Table 1. Luminous flux of general light sources

광원	광속[lm]	광원	광속[lm]
태양	3.6×10^{28}	백색 형광램프 40W	3,000
백열전구 40W	350	3파장 형광램프 40W	3,500
주광색 형광램프 40W	2,500	고압나트륨램프 400W	46,000

3) 조도

빛을 받는 면의 밝기를 표시한 것을 조도(Illumination: E)라 하며, 단위면적당 입사광속으로 표시된다.

$$E = \frac{F}{S} [lm/m^2] \quad (1)$$

F : 입사광속

S : 입사면적

단위는 룩스(Lux; lx)와 풋캔들(Footcandle: fc)을 사용하며 $1lx = \frac{1lm}{m^2}$,
 $1fc = \frac{1lm}{ft^2}$ 이다.

4) 광도

광원으로부터 모든 방향으로 빛이 발산되고 있으나, 그 방향에 따라 빛의 발산이 달라진다. 이처럼 어떤 방향에 대한 빛의 세기를 광도(Luminous intensity: I)라 하며, 그 방향의 단위입체각에 포함된 광속으로 나타낸다. 단위는 칸델라(Candela: cd)를 사용한다.

$$I = \frac{F}{\omega} \quad (2)$$

F : 입체각 ω 에 포함된 광속

ω : 입체각

점광원으로부터 모든 방향으로 균등하게 광속이 발산되면 다음 식과 같다.

$$I = \frac{F}{4\pi} \quad (3)$$

5) 휘도

광원을 볼 때 강하게 빛나 보이는데 이 빛나는 정도를 휘도(Luminance: L)라고 하며, 어떤 방향의 광도를 그 방향으로의 투영면적으로 나눈 값으로 표시된다.

$$L = \frac{I}{S'} \quad (4)$$

I : 어느 방향의 광도

S' : 어느 방향의 투영면적

단위로는 스틸브(Stilb; sb), 니트(Nit; nt) 및 풋램버트(Foot lambert: fL)를 사용하며, $1nt = \frac{1cd}{m^2}$, $1fL = 0.29191 \frac{cd}{m^2}$ 가 된다.

또한 완전확산면의 경우 휘도 L과 광속발산도 M은 $M = \pi L$ 과 같은 관계를 갖는다[지철근, 2010].

1.2 자연채광 시스템(Daylighting System)

태양빛은 인간과 동식물에게 있어서 성장과 생활과 리듬을 확보하는데 중요한 요소이며, 태양광 조명시스템은 자연 에너지 중에서 인간에게 가장 중요한 태양 빛 그 자체를 이용하는데 목적으로 하는 시스템이다. “태양광 채광전송시스템”은 태양빛이 들어오지 않는 건물 내부의 복층과 지하 공간에 태양빛을 광섬유 케이블 및 광 파이프 등을 통해 자유롭게 전송하며, 전송하는 태양빛은 인간의 건강을 활성화하거나, 동식물의 생육 및 성장에 적당한 환경을 만드는 시스템이며, 어두운 공간을 연출하기에는 적당한 시스템이다.

태양광 조명 시스템은 크게 비집광형(No Concentration) 방식과 집광형(Concentration) 방식으로 나뉘어진다. 비집광형 방식은 빛을 집중하지 않는 태양광 조명 시스템으로서 반사거울 방식, 광 덕트 혹은 광 파이프 방식이 있으며, 집광형 방식으로는 빛을 집중하는 시스템으로 렌즈 또는 반사거울-광섬유(Optical Fiber Cable) 방식이 있다.

1) 광 파이프(Sun pipe system) 방식

1988년 Stephen thornton은 일사량이 적은 영국인이 겪고 있는 계절성 우울증에 대한 방안으로서 태양광 조명 시스템을 개발하고 특허를 취득했고, 영국 Monodraught사가 이를 상용화하였다. 현재 Monodraught는 단순 기능을 가진 태양광 조명 시스템에서의 환기와 채광이 가능한 시스템으로 제품을 발전시키고 있다.

이 방식은 건물 상단 외부에 채광기를 설치하고 내부로 입사되는 태양광을 광 덕트로 전송하는 방법으로 유럽에서 가장 보편적으로 사용되는 시스템이다. 구조

는 원형, 돔형, 다이아몬드형 등 다양한 형태에 소재는 PMMA(Polymer Methyl Methacrylate), PC(Poly Carbonate)등이 이용되고 있다. 주로 생활공간, 아트리움, 지하공간, 수변전시설 등 자연광이 부족한 주거 및 업무시설에 적용 되고 있으며, 태양의 조도에 무관하게 채광효율을 유지할 수 있는 장점을 가지며 연중 운영가능일수는 260일 정도이다. Fig. 1은 광 파이프 시스템의 개념도 및 모습을 보여주고 있다.

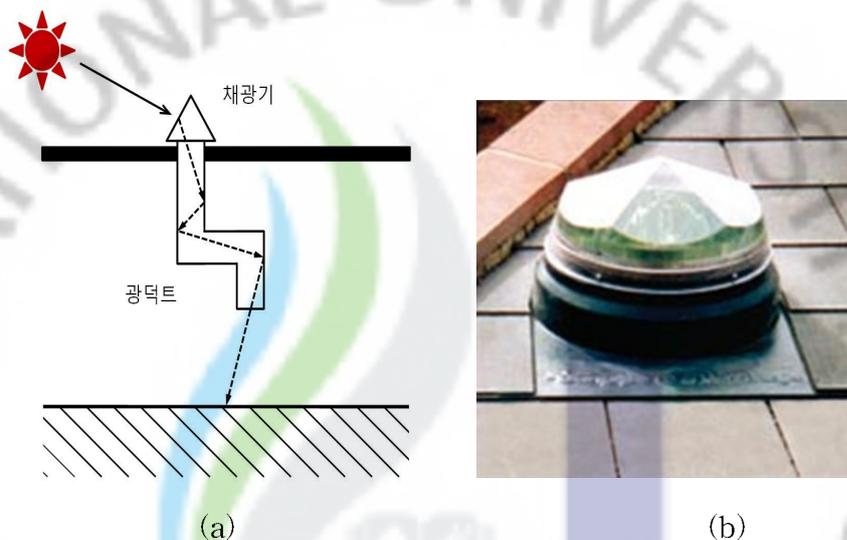


Fig. 1. Sun pipe system; (a) Schematic of sun pipe system
(b) Photograph of sun pipe system

2) 렌즈-광섬유 방식

렌즈-광 시스템은 렌즈를 통해 집광된 빛을 광섬유를 사용하여 조명에 사용하는 방식으로 태양광을 집광하는 렌즈와 집광된 빛을 전송하는 광섬유로 구성된다. 집광 효율을 높이기 위해 태양광 추적 장치가 사용되며 태양의 방위각과 경사각을 모두 추적하는 2축 방식과 경사각만을 추적하는 1축 방식이 있으며 광 전송 거리가 길고 시공이 편리한 장점이 있으나 산란광 하에서는 사용이 불가능한 단점이 있다. 연중 운영 가능일수는 120일 정도이다. Fig. 2에서 렌즈-광섬유 방식의 원리와 Himawari 시스템을 보여주고 있다.

일본 Sanyo사는 태양추적과 반사형 덕트 시스템을 혼합한 프리즘 형태의 고정형 덕트 방식인 슬라이트를 개발하여 상용화하였다. 그리고 일본의 Laforet사

는 광 덕트를 광섬유로 대체한 Himawari 시스템을 상용화하였으나 이 제품의 경우 광전송 효율성은 높으나 크기가 갖는 공간성에 많은 단점을 가진다.

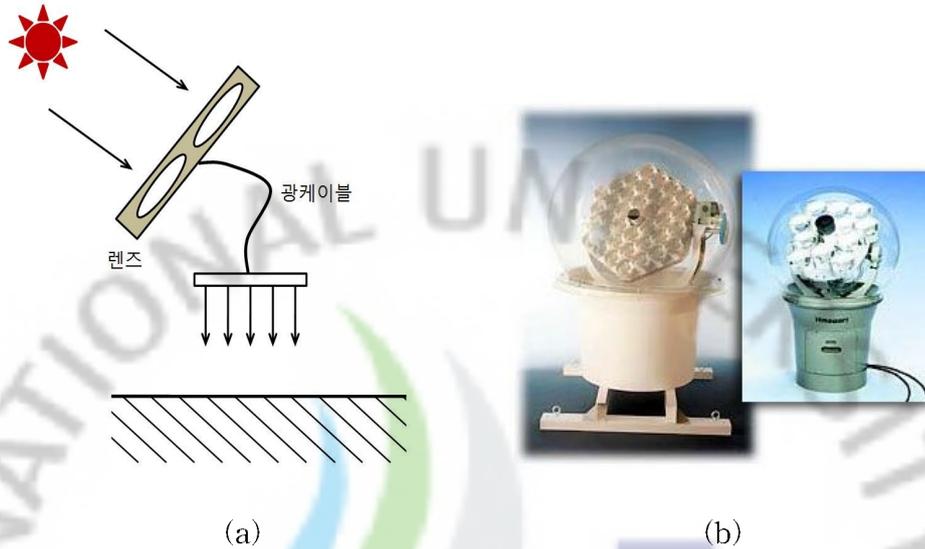


Fig. 2. Lens-optical fiber system; (a) Schematic of lens-optical fiber system (b) Photograph of Himawari solar lighting system

3) 반사거울-광섬유 방식

1990년대 미국의 Oak Ridge National Laboratory에서 수행한 연구결과를 바탕으로 Sunlight Direct사가 지름이 4ft인 대형거울을 이용하여 광을 수집하고 수집된 광은 광섬유를 이용하여 조명부로 전송하는 시스템을 개발하고 있으며 이를 상용화 추진하고 있다. 이 시스템은 파라볼라 거울을 이용해 1차적으로 태양광을 모으고 집속된 광은 2차적으로 광섬유로 전송되는 방식으로 렌즈-광섬유 방식과 동일한 집광 효율을 위해 태양광 추적 장치가 사용된다. Fig. 3은 반사거울-광섬유 방식을 보여주고 있다.

4) 반사거울 방식

반사거울을 사용하여 별도의 장치가 없이 빈 공간을 통해 빛을 전송시키는 시스템을 말한다. 거울은 평면 또는 곡면형상을 가진 것이 사용되는데, 1개로도 사용되지만 여러 개의 반사거울을 적용하여 복합화도 가능하다. 반사거울 방식은

건물이 고층화됨에 따라 발생하는 일조권 문제를 해결하기에 적합하다. Fig. 4는 반사거울 방식의 개략도 및 사진을 보여주고 있다.

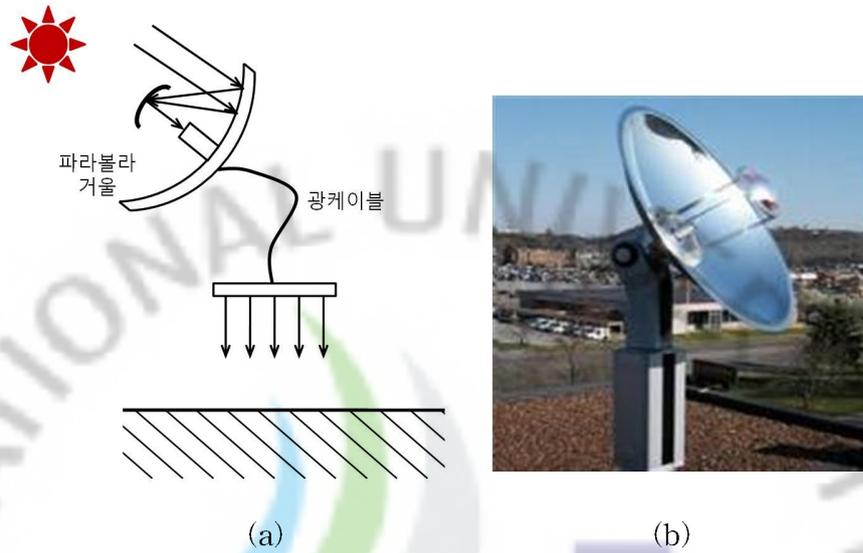


Fig. 3. Mirror-optical fiber system; (a) Schematic of mirror-optical fiber system (b) Photograph of mirror-optical fiber

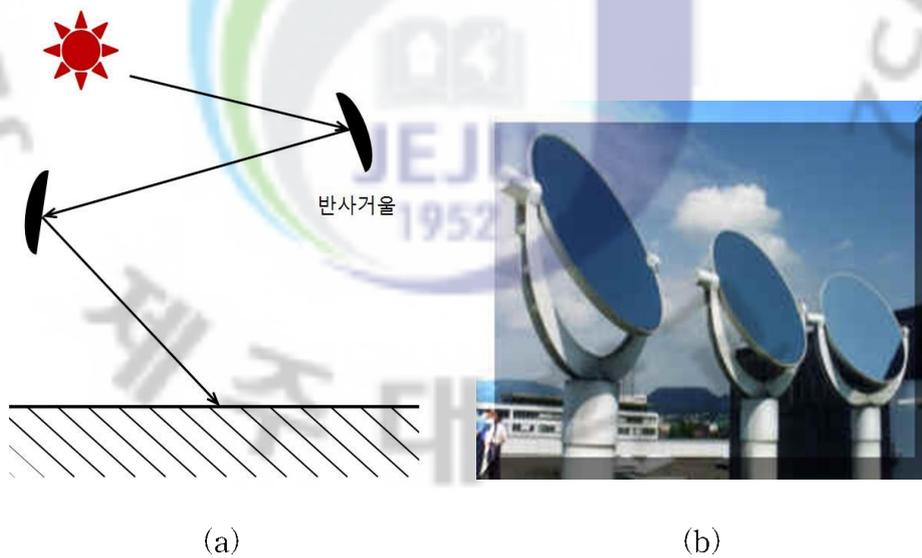


Fig. 4. Mirror heliostat system; (a) Schematic of mirror heliostat system (b) Photograph of mirror heliostat system

1.3 시뮬레이션 프로그램

1) ECOTEECT

ECOTEECT는 Square One Research사와 Andrew Marsh 박사에 의해 2000년에 개발되었다. 그 후 친환경 건물성능 평가와 그린 빌딩의 이슈화에 따라 Autodesk사에서 2008년 6월에 인수하여, 현재 최신버전인 Autodesk ECOTEECT 2011 Analysis까지 출시되었다. 본 연구에서는 ECOTEECT 2010 버전을 사용하였다.

ECOTEECT는 친환경 디자인과 환경 분석 프로그램이다. 초기 디자인 과정부터 최종평가까지 다양한 분야의 건축 환경을 평가 및 분석한다. 또한 건물 디자인과 각종 시스템들이 친환경 평가에 어떠한 영향을 미치는지 파악할 수 있다. 특히 ECOTEECT의 주요 특징이라 볼 수 있는 다양한 3D 이미지와 결과물 들은 고효율 건물 및 그린 빌딩 이슈를 직접적으로 평가가 가능하다. 주요기능은 다음과 같다.

(a) 일조 및 음영 분석

ECOTEECT를 이용하여 빠르고 간단하게 일조 평가 및 분석이 가능하다. 태양의 시간별 위치 및 연중계적 또한 파악이 가능하며, 기존의 태양궤적도로는 파악하기 어려운 태양의 위치를 해당 모델과 함께 연중 태양궤적을 3D로 표현하여 일조를 분석할 수 있다.

(b) 일사량 분석

기본적인 일사량 분석이 가능하다. 기상데이터의 수평면 일사량 분석이외에도 다양한 건물외피에서의 일사량 분석이 가능하다. 우선 기본적으로 단일 객체의 연중 월별 시간별 일사량을 그림과 같은 그래프로 한 눈에 알아볼 수 있도록 제공하며, 태양 궤적도를 통해서도 확인이 가능하다. 특히 Fig. 5.(a)와 같이 ECOTEECT 3D모델링에서의 일사량 분석이 가능하다. 연간, 일일, 시간별 평균값은 물론 해당 모델에서 다양한 이미지를 보여준다.

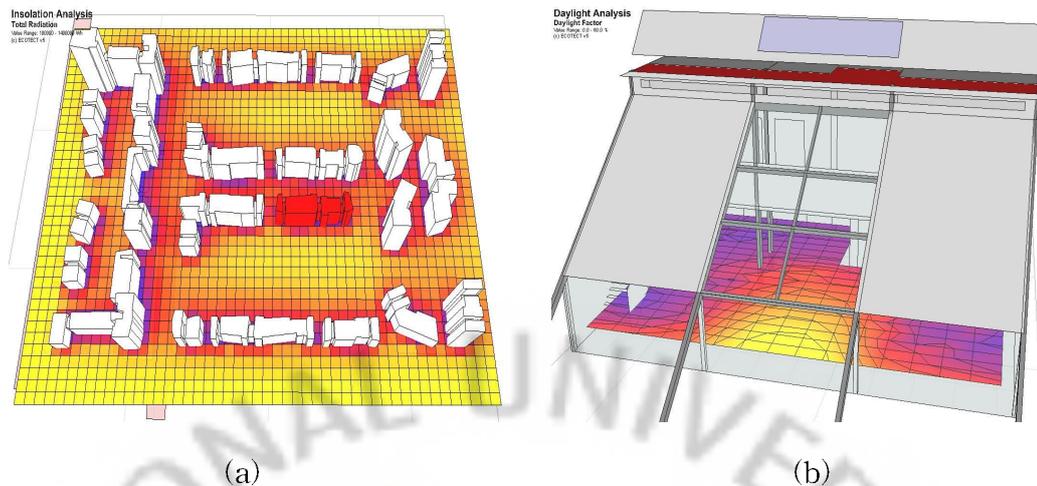


Fig. 5. Examples of ECOTECT analysis; (a) Distribution of annual insolation in 3D modeling (b) Analysis of interior illuminance distribution

(c) 실내조도 분석

각 실내공간에서의 측창 및 천창과 같은 건물 개구부 디자인에 따른 실내 조도의 분석이 가능하다. Fig. 5.(b)와 같이 실내 시뮬레이션 그리드를 통해 실내 조도와 주광률을 산출할 수 있으며, 특히 차양이나 광선반등의 디자인 요소를 적용 시 더욱 용이하게 자연채광 디자인 평가가 이루어질 수 있다. 또한 더욱 세부적인 기준을 평가하기 위해 RADIANCE 또는 DAYSIM을 통한 시뮬레이션 평가 또한 가능하다. 다양한 시뮬레이션 옵션을 통하여 좀 더 실사와 같은 이미지의 연출이 가능하며, 이를 기반으로 다양한 실내 조도 분포의 분석이 이루어질 수 있다. [고동환, 2010]

2) RADIANCE

RADIANCE 프로그램은 미국 국립 Lawrence Berkeley Laboratory(LBL)의 조명연구팀이 개발한 프로그램으로서 1987년 이래로 버클리의 캘리포니아 대학 건축공과에서 사용되어오고 있는 조명 렌더링 및 시뮬레이션 프로그램이다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 Desktop RADIANCE 2.0 버전을 활용하였다.

RADIANCE 프로그램은 역광선추적기법(Backwards Ray-tracing Technique)을 기초로 한다. 이것은 광선이 자연적으로 진행되는 방향의 반대 방향으로 추적

하여, 실제 광선이 발생한 광원의 활동을 예측하는 것을 의미한다. 그 과정은 눈으로부터 시작하여 공간의 대상물들의 표면들을 따라 모든 물리적 상호작용을 계산하여 광원까지의 광선을 쫓아가게 된다. 이러한 개념은 몬테카를로 방법과 광선추적기법에 기본 바탕을 두고 있다. 실제 공간에서 광원으로부터 반사된 광선은 결국 흡수될 때까지 반사, 투과되는데 우리가 실제로 보게 되는 장면은 이러한 광선들이 망막에 영상을 만든 것이다. 이처럼 망막에 영상이 맺히게 되는 것은 공간 내에 존재하는 전체 광선 중 일부분만이 재실자의 눈에 들어옴으로써 이루어지는 것이므로, 눈으로부터 주변 환경을 거쳐 광원으로부터의 광선을 역으로 추적함으로써, 광원으로부터 나온 광선들의 거동을 확인하여 빛 환경을 가시화할 수 있게 된다. 또한 대상공간의 기하학적, 광학적 모델링이 완료되면 광선 추적 결과로부터 조도 분포 및 휘도 분포값을 계산하고, 그 결과로부터 이미지 파일을 생성한다. 아래의 그림은 RADIANCE 관련 주요 적용분야에 대하여 보여준다[송규동, 2002].

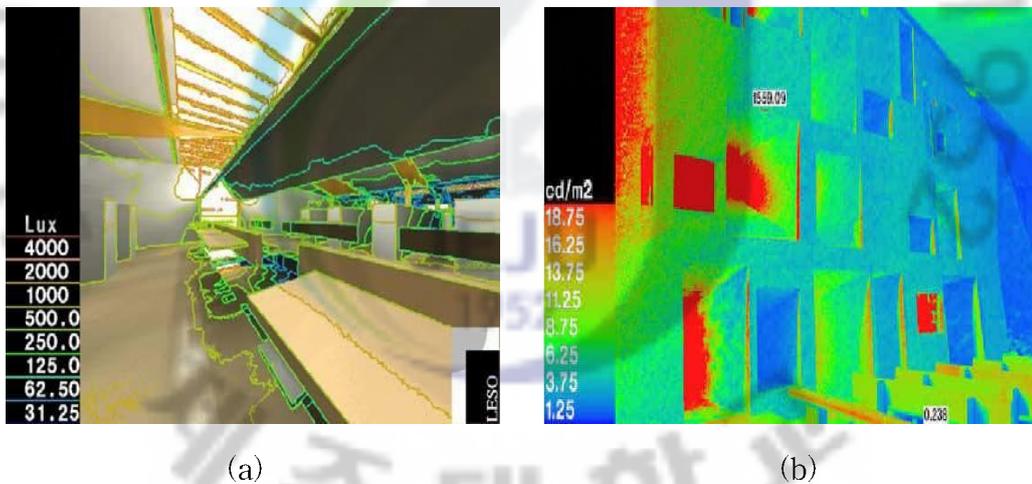


Fig. 6. Examples of RADIANCE analysis; (a) Illuminance (b) Luminance

2. 열음향 레이저(Thermoacoustic Laser)의 개발

2.1 횡파와 종파

Fig. 7.(a)는 횡파에 대한 대표적인 예로써 매질이 장력을 받고 있는 실이나 줄이다. 만일 한쪽을 위로 강하거나 약하게 흔들면, 이 흔들림이 줄의 길이 방향으로 이동한다. 줄의 다음 부분들은 순차적으로 시작부분과 같은 움직임을 겪는다. 매질의 변위가 파동의 진행 방향에 대하여 수직 또는 가로지르는 방향이므로 이를 횡파(Transverse wave)라고 한다.

Fig. 7.(b)는 종파에 대한 대표적인 예이며 매질은 오른쪽 끝이 단단한 벽이고 왼쪽은 움직일 수 있는 피스톤으로 된 관 속에 있는 액체나 기체이다. 만일 피스톤을 한 번 앞뒤로 움직이면, 매질의 변위와 압력의 교란이 길이 방향으로 이동한다. 이번에는 매질 중의 입자의 움직임이 파동의 진행 방향과 같은 방향으로 앞뒤로 움직인다. 이러한 파동을 종파(Longitudinal wave)라 한다[Hugh D. Young, 2008].



Fig. 7. Direction of wave movement; (a) Transverse wave
(b) Longitudinal wave

2.2 주기적인 파동(Periodic Waves)

손으로 한쪽 면이 고정된 줄을 위아래로 단 한 번만 흔들면 그 줄에 횡 방향

의 힘이 가해진다. 그 결과는 펄스라 불리는 단순한 ‘구불거림(Wiggle)’이 줄을 따라 이동하게 되는 것이다. 파동이 지나갔을 때 줄의 장력은 줄을 직선 모양으로 복구시켜 준다.

줄의 한 끝을 반복적, 주기적으로 운동시키게 되면 줄의 각 입자들은 모두 파동이 전달될 때 주기적 운동을 겪게 된다. 이를 주기적인 파동(Periodic wave)이라 한다.

1) 주기적 횡파

줄을 진폭 A , 진동수 f , 각진동수 $\omega = 2\pi f$, 주기 $T = 1/f = 2\pi/\omega$ 의 단순 조화 운동(Simple harmonic motion)으로 아래위로 흔든다고 가정하면 그 결과로 만들어지는 파동은 마루와 골이 대칭적으로 반복되는 파동이다. 단순 조화 운동의 주기파는 분석이 아주 쉬운데 이를 사인파(Sinusoidal waves)라고 한다. 어떤 주기적 파동도 이러한 사인파의 조합으로 표현될 수 있다고 알려져 있다.

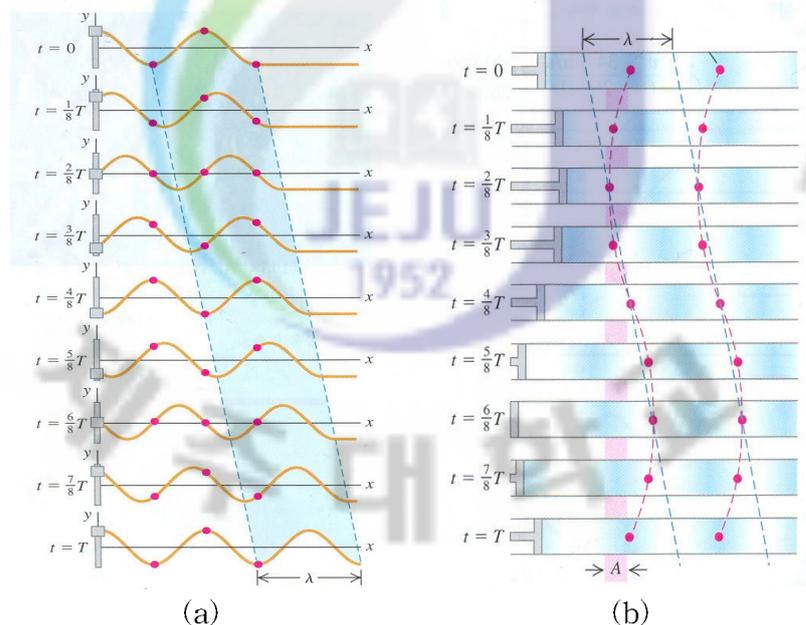


Fig. 8. Periodic wave; (a) Transverse wave (b) Longitudinal wave

Fig. 8. (a)에서 줄을 따라 진행하는 파동은 사인파 요동이 연속적으로 이어지

는 것이다. 줄의 왼쪽 끝 부분의 모양을 1/8주기 간격으로 한 주기 동안 나타낸 것이며 파동 모양은 그림에서 진한 부분으로 표시한 것과 같이 오른쪽으로 안정되게 이동한다. 파동이 진행할 때 그림에서 붉은 점으로 표시한 것과 같이 줄 위의 각 지점은 평형 점에 대하여 위아래로 단순 조화 운동을 한다. 즉, 사인파가 매질을 지나갈 때, 파동의 각 지점은 같은 진동수로 단순 조화 운동을 하는 것을 의미한다.

특정한 순간에서 주기적 파동의 모습은 동일형태의 반복이다. 완전한 한 파동 형태의 길이는 한 마루에서 다음 마루까지의 거리, 또는 한 골에서 다음 골까지, 또는 파동 모양의 어느 한 지점에서 다음의 동일한 지점까지의 거리이다. 이를 파장(λ)이라 부르고, 일정한 속도 v 로 움직이는 파동은 한 주기 T 라 부르는 시간 동안 한 파장 λ 만큼 진행한다. 파동의 속도는 $v = \lambda T$, 또는 $f = 1/T$ 이므로 다음과 같다.

$$v = \lambda f \text{ (주기적 파동)} \quad (5)$$

전파 속력은 파장과 진동수의 곱이 된다. 여기에서 줄의 모든 지점은 동일한 진동수 f 로 진동하기 때문에, 진동수는 파동 전체에 대한 특성이 된다.

2) 주기적 종파

Fig. 8.(b)와 같이 한쪽에 피스톤이 달려있고 액체로 채워진 좁은 관을 고려하면, 피스톤을 밀어 넣을 때, 그 부근의 액체가 눌리고, 이 지역의 압력이 증가한다. 이 지역은 인접한 지역의 액체를 밀어내고, 이 과정이 계속되면서 펄스파가 관을 따라 이동한다.

이 피스톤을 관의 축 방향을 따라 단순 조화 운동으로 계속 앞뒤로 밀고 당긴다고 가정하면 이 운동은 액체에서 압력과 밀도가 평형 상태보다 커지거나 작아지는 지역을 형성한다. Fig. 8.(b)에서 어둡게 표시된 지역이 밀한 지역이고, 밝은 부분이 소한 지역이다. 파장은 밀한 지점 한 곳에서 다음 밀한 지점까지, 또는 소한 지점에서 다음 소한 지역까지의 거리이다. 또 횡파와 마찬가지로 액체 관을 따라 전파되는 파동을 1/8주기로 나타낸 것을 알 수 있다. 밀과 소의 형태

가 오른쪽으로 안정되게 이동하는데, 이는 Fig. 8.(a)의 사인파의 마루와 골이 이동하는 형태와 같다. 그리고 주기적인 횡파의 사인파처럼 주기적인 종파도 한 주기 동안 한 파장 λ 만큼 우측으로 이동하기 때문에 기본 방정식 $v=f\lambda$ 는 종파의 경우도 횡파와 마찬가지로 성립하게 된다.

2.3 정상음파(Standing wave)

음향파가 유한한 길이의 관 속에 있는 유체 속으로 진파되면, 파동은 관 끝에서 반사된다. 반대 방향으로 진행하는 파동들이 중첩되면 정상파가 형성된다. 관 속의 정상음파는 주변의 공기에 음파를 만드는데 사용될 수 있다. 횡파는 정상파를 포함하여 일반적으로 변위로만 기술되나, 유체 속의 종파 즉, 음파는 유체의 변위나 유체 내의 압력 변화로도 설명된다. 혼동을 피하기 위해 마디(Node)와 배(Antinode)라는 용어를 사용하며 압력 마디는 항상 변위 배이고 압력 배는 항상 변위 마디이다.

Fig. 9는 관 속의 기체에 형성된 한 주기가 T인 정상음파 안에 있는 입자 9개의 움직임을 $1/8T$ 간격으로 보여 주고 있다. 변위 마디(N)에 있는 입자의 움직이지 않으며, 변위 배(A)에 있는 입자는 최대 진폭으로 진동한다. 변위 마디를 서로 반대편에 있는 입자들은 반대방향으로 진동한다. 이 입자들이 서로 접근할 때, 중간에 있는 기체는 압축되어 압력이 올라간다. 두 입자가 서로 멀어질 때는 팽창이 일어나서 압력이 떨어진다. 따라서 변위 마디에서는 기체는 가장 크게 압축되고 가장 크게 팽창하며, 평균의 아래위로 오르내리는 압력과 밀도의 진동은 최댓값이 된다. 반면에 변위 배를 중심으로 서로 반대편에 있는 입자들은 같은 위상으로 진동한다. 입자들 사이의 거리는 거의 일정하고, 변위 배에서 압력이나 밀도의 변동은 없다. 정상음파에서 압력과 밀도가 변하지 않는 지점을 압력 마디(Pressure node), 압력과 밀도 변화가 가장 큰 지점을 압력 배(Pressure antinode)라고 한다.

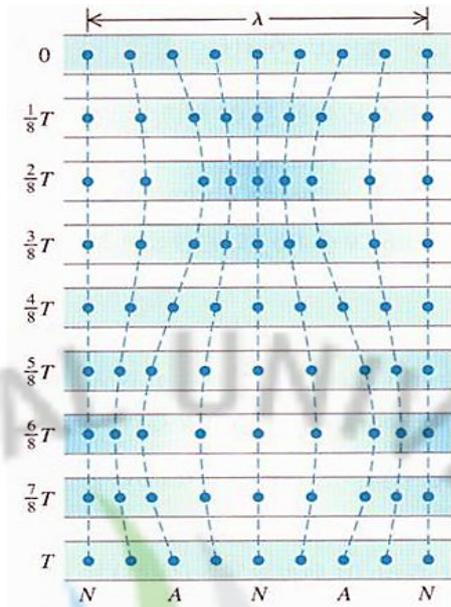


Fig. 9. Standing wave in a tube;

N : Displacement node(Pressure antinode),

A : Displacement antinode(Pressure node)

관의 막힌 끝에서 반사가 일어날 때, 이 끝에서 입자의 변위는 줄의 고정 끝에서와 같이 항상 0이다. 따라서 관의 막힌 끝은 변위 마디와 압력 배가 되고 입자는 움직이지 않는다. 그러나 압력의 변화는 최대가 된다. 관의 열린 끝은 공기 중에 열려 있으므로 압력 마디가 되고 여기에서는 압력은 일정하고 변하지 않는다. 이것 때문에 열린 끝은 항상 변위 배가 된다[Hugh D. Young, 2008].

2.4 한쪽 면이 닫힌 튜브의 진동수

Fig. 10은 한쪽 면이 열린 튜브에서의 정상파 패턴을 보여주고 있다. 이 경우, 열린 끝은 변위 배(압력마디)이지만, 닫힌 끝은 변위 마디(압력 배)이다. 마디와 바로 옆이 배 사이 거리는 항상 1/4 파장이다. Fig. 10.(a)는 가장 낮은 진동수 모드를 보여준다. 관의 길이는 1/4파장($L = \lambda/4$)이다. 따라서 기본진동수 $f_1 = v/\lambda$ 는 식 (6)과 같다.

$$f_1 = \frac{v}{4L} \quad (6)$$

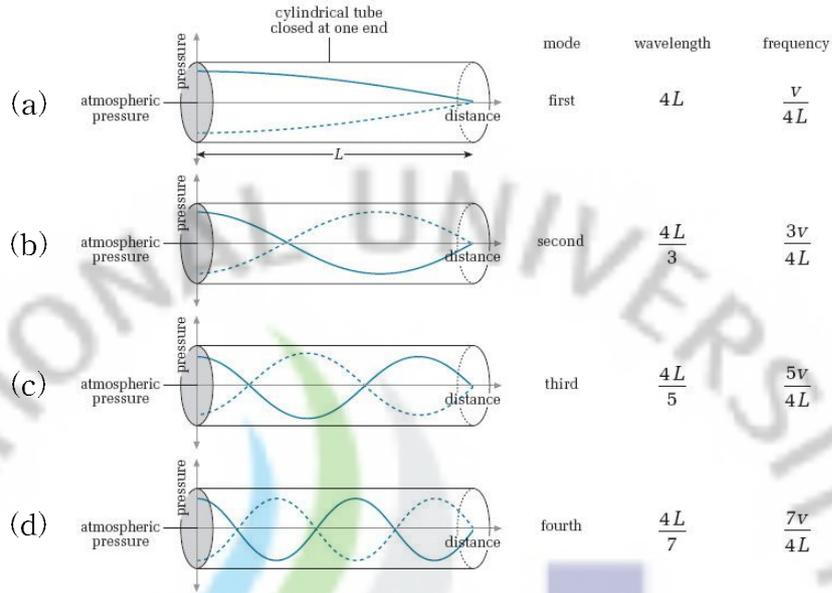


Fig. 10. Pattern of standing waves in a tube with one open end;
 (a) 1st mode (b) 2nd mode (c) 3rd mode (d) 4th mode

이것은 길이가 같은 열린 관의 기본진동수의 절반이다. 한쪽이 닫힌 관의 음정은 같은 길이의 열린 관에 비하여 한 옥타브 낮다. 즉 진동수가 1/2 배이다. Fig. 10의 (b)는 그 다음 모드를 보여주고 있다. 관의 길이는 파장의 3/4이고 진동수 $3f_1$ 에 해당한다. 세 번째는 $L=5\lambda/4$ 이고 진동수는 $5f_1$ 이다. 따라서 닫힌 관에서의 가능한 파장은 다음과 같다.

$$L = n \frac{\lambda_n}{4} \quad \text{또는,} \quad \lambda_n = \frac{4L}{n} \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (7)$$

정규모드의 진동수 $fn = v/\lambda n$ 은 다음과 같이 된다.

$$f_n = \frac{nv}{4L} \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (8)$$

식(8)을 보면 둘째, 넷째, 그리고 모든 짝수의 조화 음이 없다. 한쪽이 닫힌 관에서 기본진동수는 식(8)과 같고, 홀수의 조화 음만 가능하다.

2.5 음향파(소리)의 발생

모든 물체는 자신의 고유한 진동수를 가지고 있다. Sondhauss 튜브에서 보면 공기입자들이 진동을 하게 되며, 공기입자들은 이에 따라 다양한 범위의 진동수를 갖는 사인파를 생성한다. 그리고 한쪽 끝이 닫힌 튜브는 $L = \lambda/4$ ($f = \frac{v}{4L}$)에 의해 $1f, 3f, 5f, 7f \dots$ 등의 진동수를 갖는 정규모드를 가지고 있다. 하지만 본 실험에서의 열원이 계속적으로 변화하는 힘을 가해주고 있기 때문에(이를 강제 진동이라고 함) 이러한 강제진동의 구동진동수 f 가 정규모드 중의 하나에 가깝게 되면 튜브 안의 공기가 그 정규모드로 진동할 것이고, 진폭은 상당히 커질 것이다. 따라서 음향파의 Power 즉, 음압이 증가하게 되고 이를 공명이라고 한다. 이러한 공명 현상 때문에 소리(음향파)가 발생하게 되는 것이다.

강제력의 진동수가 정확히 한 정규모드의 진동수와 같으며 계가 공명을 일으키고, 강제 진동의 진폭이 최대가 된다. 마찰력이나 에너지를 소진시키는 요인이 없으면 정규모드와 같은 진동수의 강제력은 계에 에너지를 계속해서 더할 것이고, 진폭은 끝없이 커질 것이다(정규모드(nf)가 계속 증가함에 따라 계속 최대 진폭이 커짐). 그러나 실제의 계에서는 항상 에너지가 소멸되거나 감소된다. 따라서 공명이 일어날 때의 진폭이 아주 클 수는 있지만 무한히 커지지는 않는다.

조개껍데기, 병, 포도주 잔들도 물체마다의 정규모드가 있고 예를 들어 포도주 잔의 정규 모드와 성악가의 다양한 진동수에 의해 진동수가 일치하게 되면 진폭이 매우 큰 진동이 형성되어 잔이 깨지게 된다[Hugh D. Young, 2008].

2.6 파동방정식(Wave equation)

일반적으로 음파는 유체 내의 압력 교란에 의하여 파의 진행 방향으로 매질이 진진과 후퇴를 반복하는 압축과 팽창의 반복현상이다. 따라서 음파의 전파에 관련되는 복원력은 매질의 압축과 팽창에 의한 압력 변화에 기인한다. 즉 음파에 의한 압력 교란 p 는 밀도변화 ρ 와 매질의 입자 속도 u 를 수반한다. 음파가 없을 때 평균 압력 p_0 , 평균밀도 ρ_0 , 평균 유속 u_0 라 하면 음파가 전파할 때 압력, 밀도 및 입자 속도는

$$p_T = p_0 + p \quad (9)$$

$$\rho_T = \rho_0 + \rho \quad (10)$$

$$u_T = u_0 + u \quad (11)$$

로 표시된다.

매질 내의 음파를 기술하기 위해서는 매질의 상태 방정식이 필요하다. 음파는 짧은 시간에 매질의 압축 상태로 변화시키기 때문에 등 엔트로피 변화를 유발시킨다. 이때 실제 기체의 상태방정식은

$$\left(\frac{p_T}{p_0}\right) = \left(\frac{\rho_T}{\rho_0}\right)^\gamma \quad (12)$$

로 표시된다. 이것을 테일러급수로 전개하여 밀도의 1차항만 취하면

$$p_T = p_0 + \left(\frac{\partial p_T}{\partial \rho}\right)_{\rho_0} (\rho_T - \rho_0) \quad (13)$$

한편 음파의 진행에 따라 공간상 특정 위치의 체적 요소에 질량의 유입과 유출이 발생한다. 이때 질량의 유입률은 밀도의 증가율과 같아야 하기 때문에 연속

방정식

$$\frac{\partial \rho_T}{\partial \rho} + \nabla \cdot (\rho_T u_T) = 0 \quad (14)$$

을 만족하여야 한다. 작은 체적 요소를 고려할 때 유체의 점도 때문에 이상적인 단열 압축 과정이 이루어지지 않으며 음파는 에너지 손실을 겪게 된다. 우선은 열전도에 의한 손실과 점도에 의한 손실을 무시하고, 비점도성 이상유체를 가정하면, 작은 체적 요소에 작용하는 힘의 평형 조건은 다음과 같다.

$$\nabla p_T + \rho_T \left[\frac{\partial \rho_T}{\partial \rho} + (u_T \cdot \nabla) u_T \right] = 0 \quad (15)$$

위에서 도입한 식(13)~(15)를 정리하여 각 종속 변수에 대한 단일 미분 방정식을 유도할 수 있다. 이것이 음파의 파동 방정식들이다. 매질의 유동이 없고 음압이 낮아서 음파의 변수들이 평균 상태변수에 비하여 극히 작은 경우 식(13)~(15)의 1차 미분 항을 취하면

$$p = \left(\frac{\partial P_T}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} \rho \quad (16)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} + \rho_0 \nabla \cdot u = 0 \quad (17)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (18)$$

를 얻는다. 이들을 연립시켜 각 음파 변수에 대한 미분 방정식을 구하면

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (19)$$

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (20)$$

$$\nabla^2 \rho = \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} \quad (21)$$

과 같은 선형 파동방정식들을 얻는다. 여기서 음파의 전파 속도는

$$c_o^2 = \left(\frac{\partial p_T}{\partial \rho} \right)_{\rho_o} \quad (22)$$

이며 식 (17)의 관계로부터

$$c_o^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \quad (23)$$

임을 알 수 있다. 전파에 따른 음파의 에너지 손실을 고려치 않을 경우 전파 속도 c_o 는 주파수에 무관한 상수다[윤석왕, 2003].

Ⅲ. 광 파이프 시뮬레이션

1. 모델링 및 시뮬레이션

본 연구에서는 ECOETECT와 RADIANCE 프로그램을 활용하여 시뮬레이션 하였다. 광파이프 시스템을 설계하여 기본성능 분석을 하였고, 광파이프의 직경 및 높이를 바꾸어 이에 따른 광파이프 시스템의 최적의 형상을 찾고자 조도값을 비교하였다. ECOETECT는 기본 알고리즘 상에서 투과, 흡수는 가능하지만 굴절이 가능하지 않기 때문에 Diffuser에 대한 빛 분포 구현이 가능하지 않아 RADIANCE 프로그램을 연동한 것이다.

모델링 된 건물은 광 파이프 시스템을 통한 조도값 및 조도 분포에 대한 정확성을 높이기 위해 창문 없이(무창 공간) 설계하였고, 실제 강의실과 유사한 환경을 구현하기 위해 4개의 책상을 배치하였다. 무창 공간은 7.4m×7m의 크기, 2.7m의 높이를 가지며, 천장과 책상과의 거리는 1.95m이다. 그리고 광 파이프는 건물 전방에서 2.4m, 옆 벽면으로부터 3.7m의 거리를 두어 천장 부분에 배치하였다. Fig. 11은 본 시뮬레이션을 위해 ECOETECT를 이용하여 모델링한 것을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 11.(d)는 ECOETECT 프로그램의 'Visualize'의 기능을 통해 무창 공간 뒷면에서 초점을 두었을 때의 모습이다.

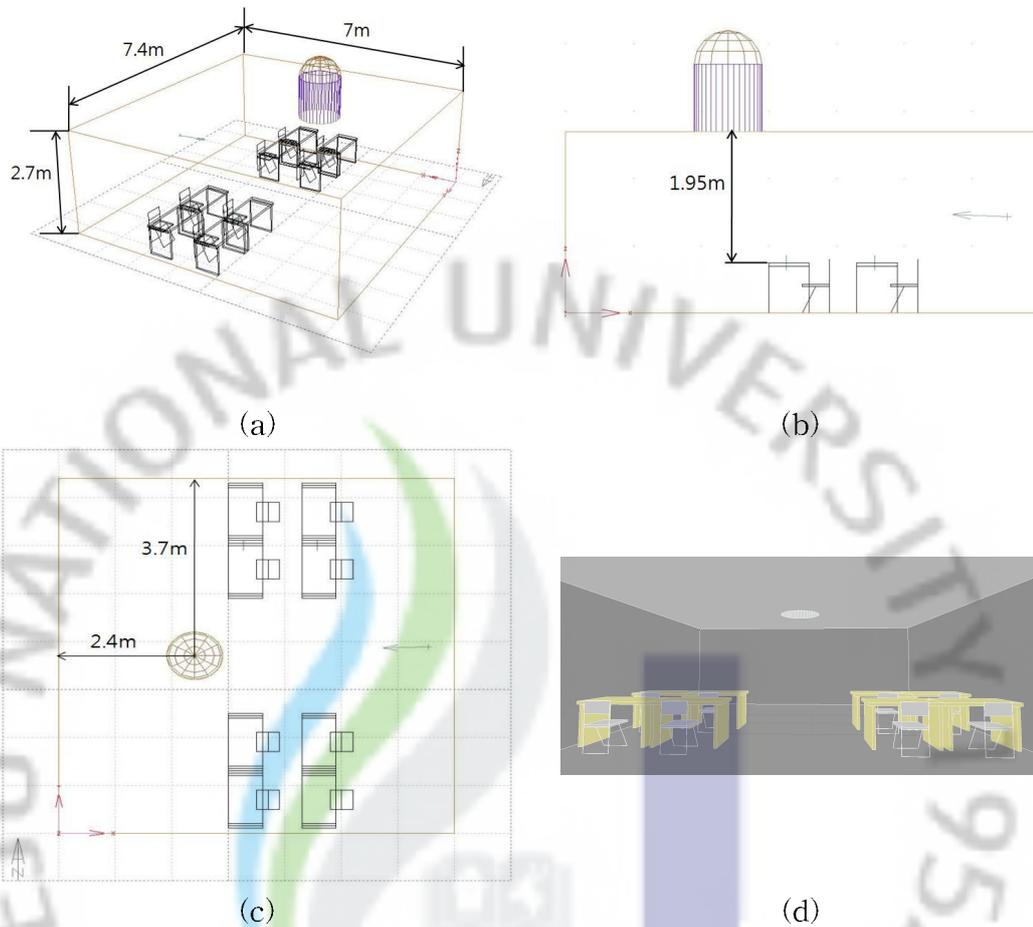


Fig. 11. Modeling by ECOTECT; (a) Top view (b) Side view
(c) Isometric view (d) 3D sectional view

본 연구에서의 광 파이프는 빛을 채광하는 Dome, 채광된 빛을 전송시키는 Light pipe, 그리고 마지막으로 실내로 전송된 빛을 산란시키는 Diffuser로 구성되어 있다. Dome과 Diffuser의 재질은 Glass, 투과율은 0.9로 동일하게 적용하였고, Light pipe는 반사율을 0.748로 두어 시뮬레이션 하였다. Table 2는 이에 대한 구성품들의 크기 및 시뮬레이션 조건값을 보여주고 있다.

Table 2. Conditions of the sun pipe components used in the present modeling

Dome	Material	Glass
	Diameter(m)	Φ 0.6, 0.8, 1.0
	Thickness	0.6
	Solar absorption	0.1
	Visible transmittance	0.9
Light pipe	Material	Mirror
	Diameter(m)	Φ 0.6, 0.8, 1.0
	Height(m)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
	Thickness	0.6
	Solar absorption	0.252
	Total reflectance of material	0.748
Diffuser	Material	Glass
	Diameter(m)	Φ 0.6, 0.8, 1.0
	Surface roughness	0.05
	Total transmittance of the material	0.9

본 연구에서는 첫 번째 시뮬레이션으로 광 파이프 기본 성능 분석을 하였다. 시뮬레이션을 통해 광 파이프 시스템이 설치되어 있지 않은 경우와 Diffuser의 유무를 비교하여 분석하였다. 광 파이프의 직경은 0.8m, Light pipe의 높이는 1.0m로 설정하였다.

그리고 두 번째 시뮬레이션에서는 광 파이프의 직경을 0.6, 0.8, 1.0m, Light pipe의 높이를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0m로 변경하여 최적의 광 파이프 형상을 찾기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 12는 최적화 시뮬레이션을 위해 모델링된 광 파이프의 모습 및 조건을 보여주고 있다.

두 가지의 시뮬레이션 모두 동일하게 천공 상태를 ECOTECT 프로그램의 'Sunny Sky'로 적용하였고, 시뮬레이션 시간은 대한민국에서 태양의 고도가 가장 높을 때인 하지(양력 6월 22일) 낮 12시로 설정하였다. 그리고 기후는 서울 기후 데이터를 적용하였고, 모델링 된 무창 공간의 전체적인 조도를 보기 위해

카메라 View는 어안렌즈(Fish-eye lens)를 배치하여 실내 조도값을 분석하였다.

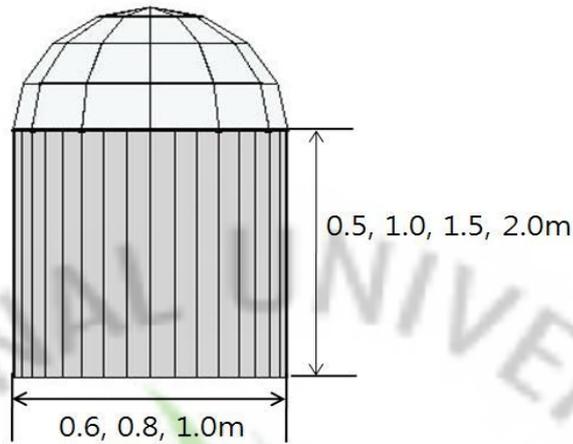


Fig. 12. A sun pipe system for simulation

광 파이프 형상의 최적화 시뮬레이션에서는 책상 위 4개, 바닥 6개, 총 10개의 지점에서 조도값이 측정 되었다. Fig. 13은 무창 공간 내의 측정 지점을 보여주고 있다.

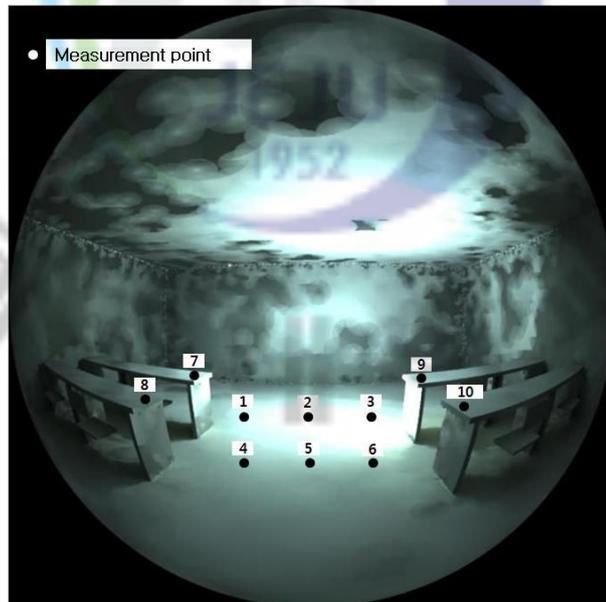


Fig. 13. Measurement points on floor for analyzing illuminance

2. 결과 분석 및 고찰

2.1 광 파이프의 기본 성능 시뮬레이션

1) 광 파이프 시스템 미적용

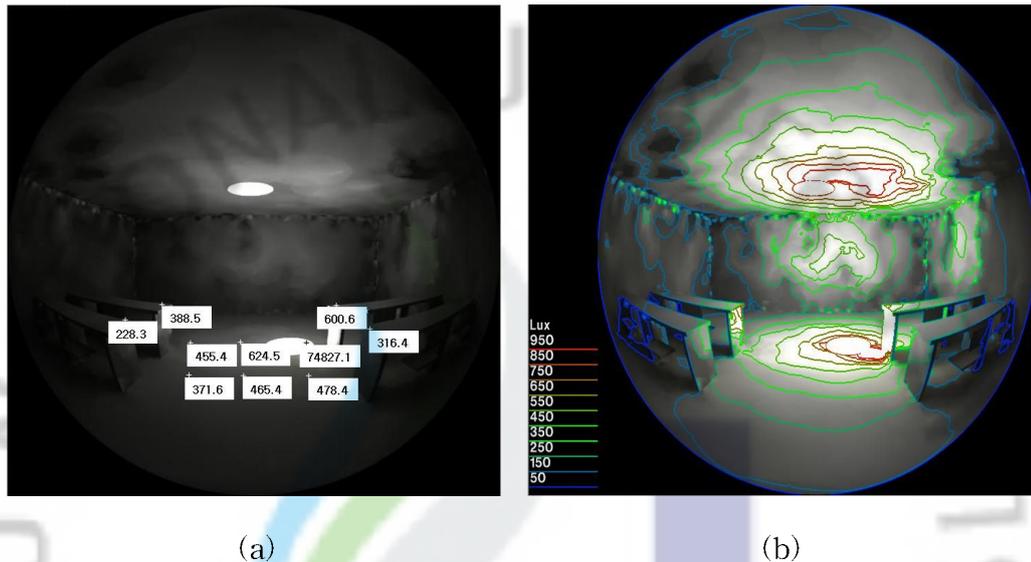
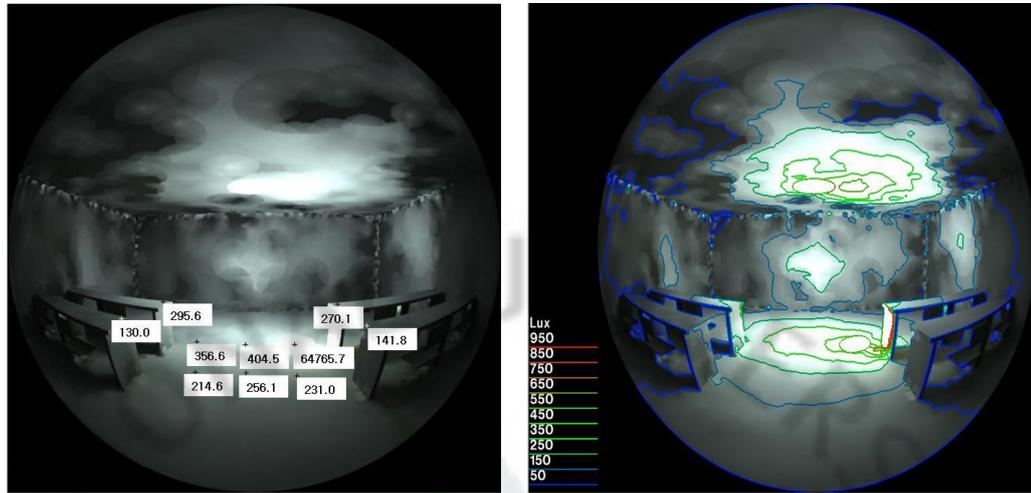


Fig. 14. Illuminance distribution of lightless space without any sun pipe system; (a) Illuminance(lux) (b) Isolux lines

Fig. 14는 광 파이프 시스템을 적용하지 않았을 경우 6월 22일(하지) 낮 12시의 실내 조도값과 등조도선을 보여주고 있다. 최대 조도값은 74,827.1 lux로써 태양의 직사광을 의미하며 광 파이프 시스템이 없기 때문에 조도 분포가 한군데로 집중되는 것을 알 수 있다. 실내로 유입되는 태양광을 넓게 분포 시킬 수 없다면 실내조명으로 적용하기에 어려움이 있다. 이에 따라 광 파이프 및 Diffuser가 요구 된다.

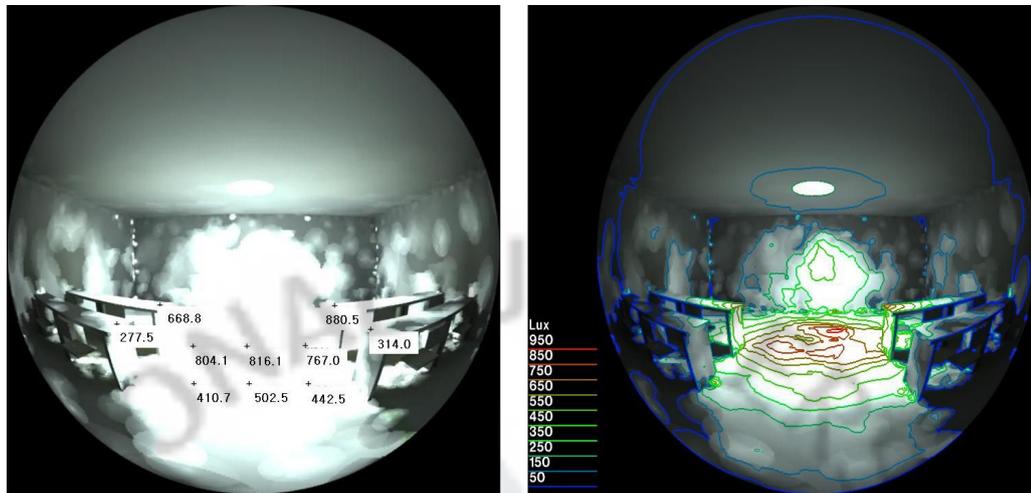
2) Diffuser 미적용 광 파이프 시스템



(a) (b)
 Fig. 15. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system(without diffuser); (a) Illuminance(lux) (b) Isolux lines

Fig. 15를 통해 광 파이프 미적용 상태일 때 보다 조도값이 조금 떨어진 것을 알 수 있다. 이 그림 역시 조도 분포가 한곳으로 집중되고 있으며, 이에 따라 광 파이프 시스템에서 Diffuser를 통해 태양광을 균등하게 실내로 유입시켜 실제 사무 환경을 만들어야 함을 알 수 있었다.

3) 광 파이프 및 Diffuser 적용 시스템



(a)

(b)

Fig. 16. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system(with diffuser); (a) Illuminance(lux) (b) Isolux lines

Fig. 16은 광 파이프와 Diffuser를 적용하여 조도 분포를 분석한 것으로 실내로 입사되는 빛이 넓게 분포됨을 알 수 있다. 조도값 측정 결과 광 파이프를 설치한 지점으로부터 바닥면 부분에 400~800 lux 정도의 조도로 골고루 분포되어 있다. 이 수치는 실내 사무 환경과 비슷한 값을 가지며, 낮 12시 이외에는 태양 고도가 낮아지기 때문에 조도값이 감소하지만 광 파이프의 기하학적 형태를 변경함으로써 조도값을 증가시킬 수 있다. 이에 대한 내용은 두 번째 시뮬레이션에서 다루고 있다.

2.2 광 파이프의 최적화 시뮬레이션

1) 직경 0.6m 광 파이프의 조도 분포

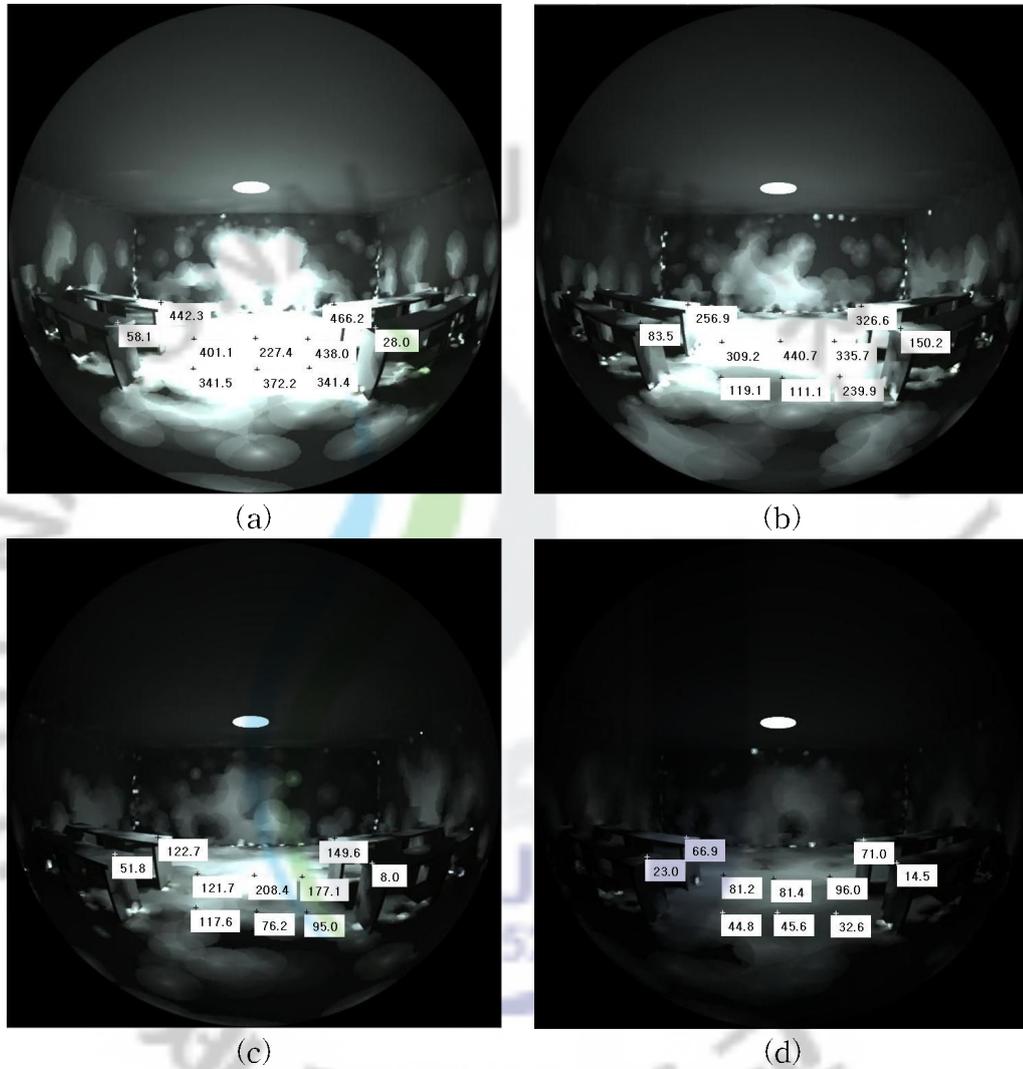


Fig. 17. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system of 0.6m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m

그림을 보면 알 수 있듯이, 최대 조도값은 광 파이프가 0.5m일 때 466.2 lux로 가장 높았고 2.0m일 때 96.0 lux로써 가장 낮은 조도를 보인다. 일반적인 사무 환경에서의 조도는 약 400~800 lux이므로 Light pipe가 1.0, 1.5, 2.0m일 때는 이에 적합하지 않은 조도가 나왔음을 알 수가 있다.

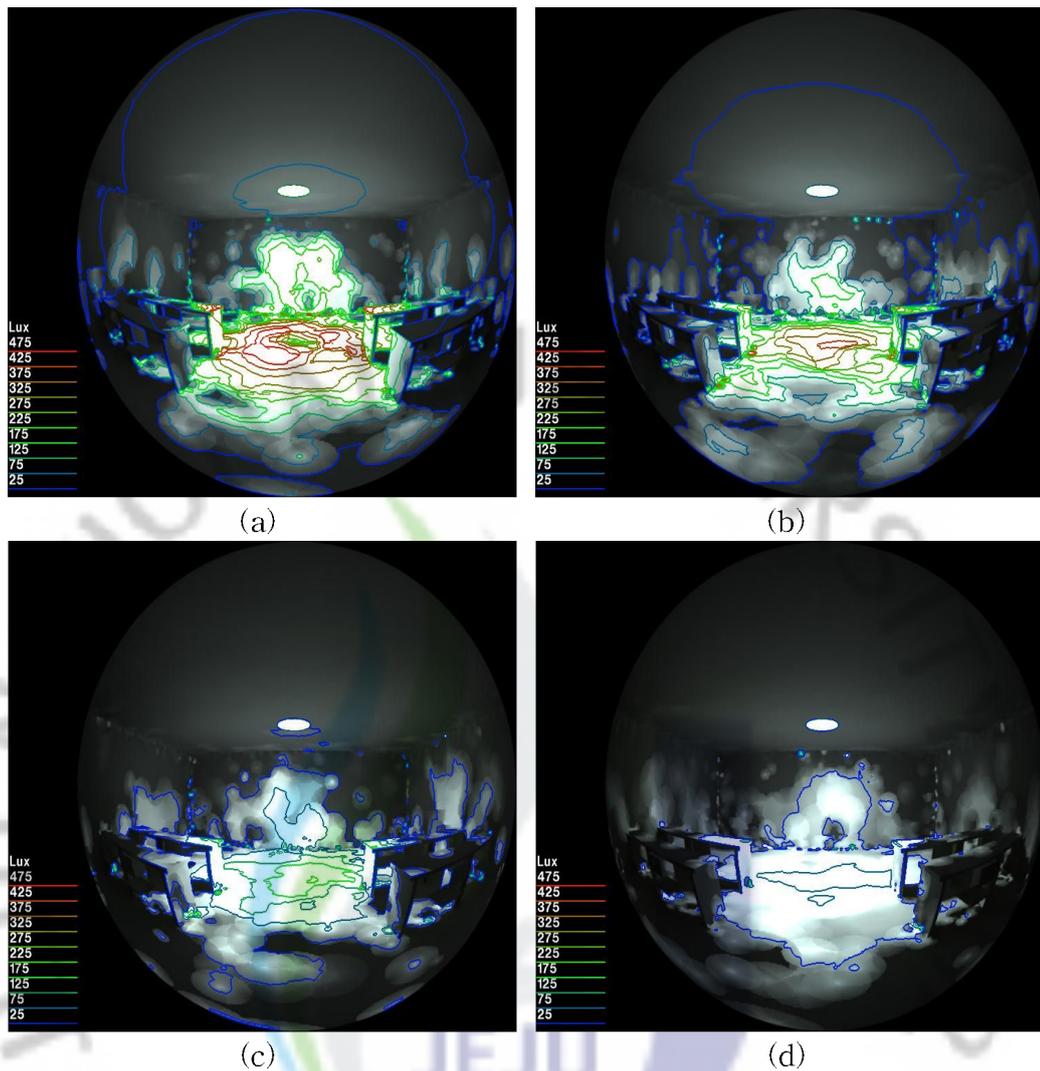


Fig. 18. Isolux lines of lightless space with a sun pipe system of 0.6m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m

Fig. 18은 광 파이프의 직경이 0.6m일 때의 등조도선을 보여주고 있다. Light pipe의 높이가 0.5m일 때 약 500 lux의 조도가 다른 높이에 비하여 가장 넓게 분포하고 있음을 보여주고 있으며, 등조도선을 통해 Light pipe의 높이가 2.0m인 경우에는 0.5m일 때 비하여 확연하게 조도값이 감소했음을 알 수 있다.

2) 직경 0.8m 광 파이프의 조도 분포

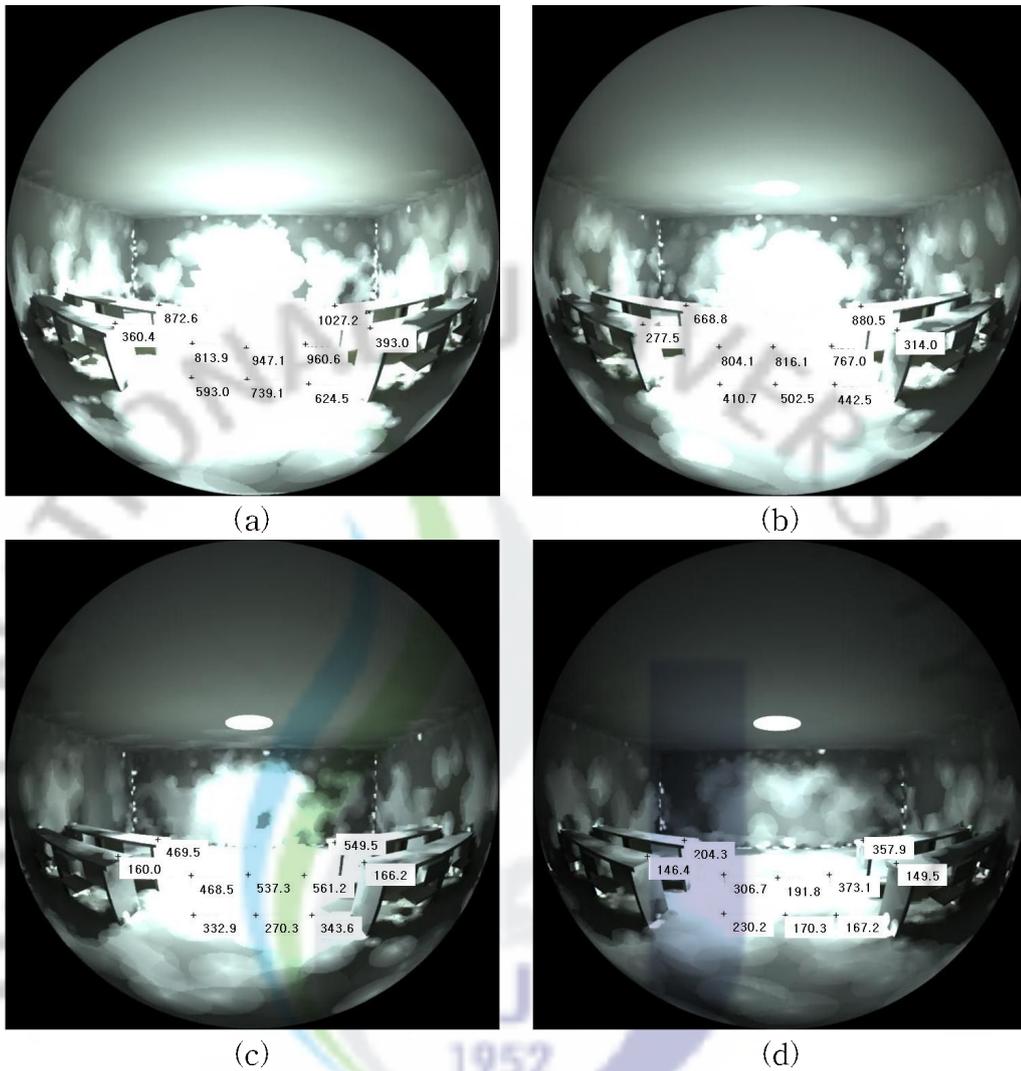


Fig. 19. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system of 0.8m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m

광 파이프의 직경이 0.8m이고 Light pipe의 높이가 0.5m인 경우 최대 조도값은 1027.2 lux이며, 높이가 2.0m인 경우 373.1 lux이었다. Fig. 19를 통해 광 파이프의 직경이 0.6m일 때보다 전체적으로 조도값이 증가한 것을 알 수 있다. 그리고 Light pipe의 높이가 2.0m인 경우를 제외하고는 실제 사무에 적합한 조도값(400~800 lux)을 보여주었다.

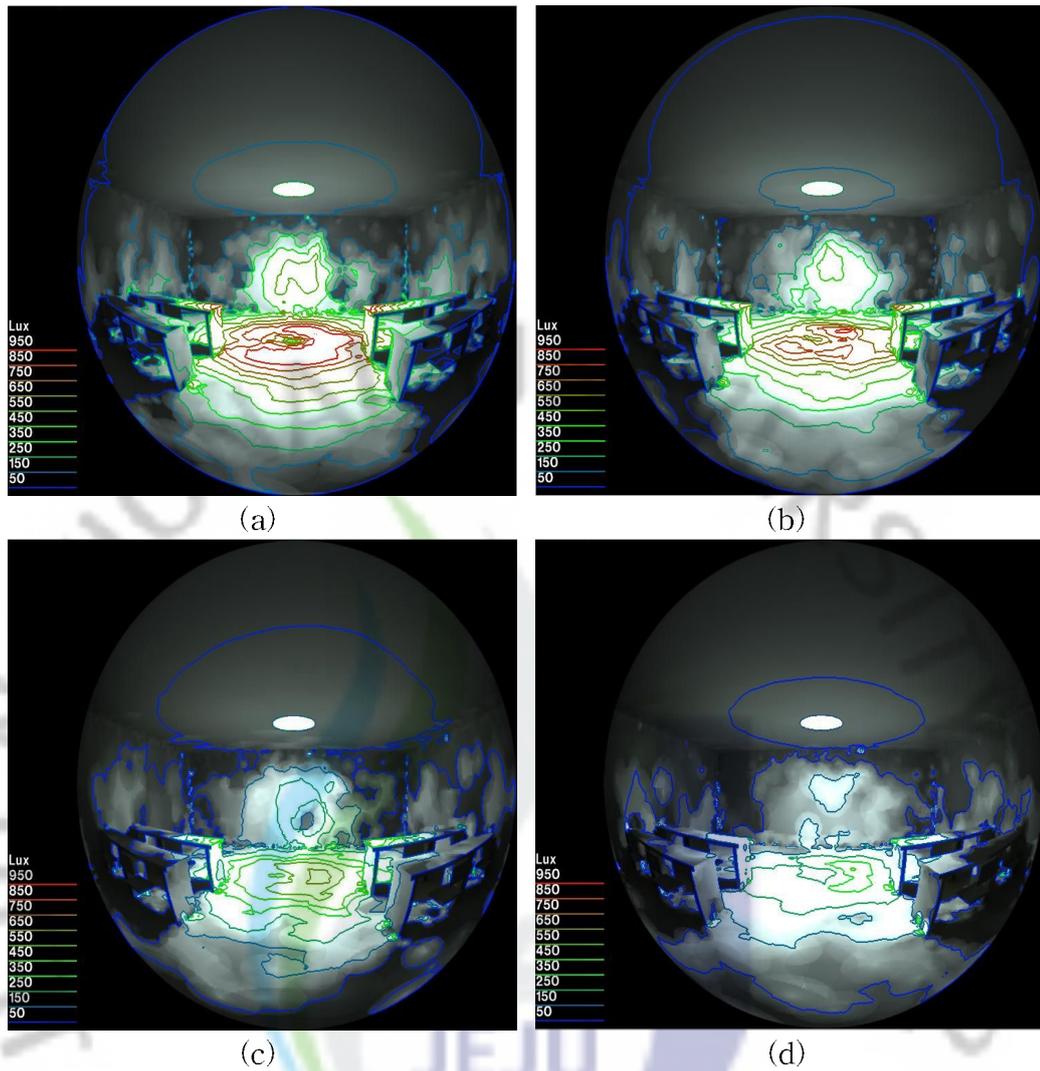


Fig. 20. Isolux lines of lightless space with a sun pipe system of 0.8m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m

Fig. 20은 광 파이프의 직경이 0.8m일 때의 등조도선을 보여주고 있다. Light pipe의 높이가 0.5m일 때 약 1000 lux 이상인 조도가 가장 넓게 분포하고 있음을 알 수 있으며, 높이가 2.0m인 경우에는 약 500 lux이하의 조도값이 분포되어 있다.

3) 직경 1.0m 광 파이프의 조도 분포

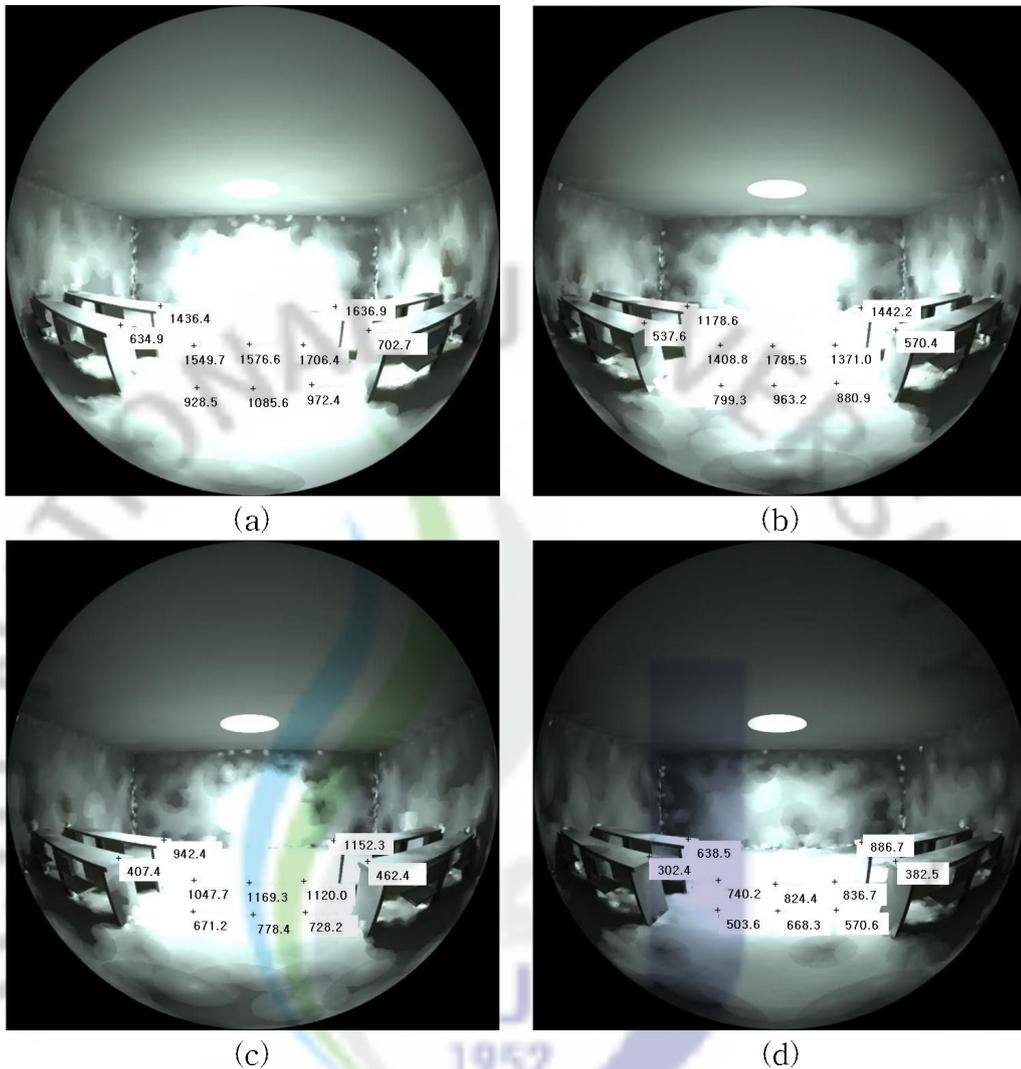


Fig. 21. Illuminance distribution of lightless space with a sun pipe system of 1.0m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m

광 파이프의 직경이 1.0인 경우에는 최대 조도값이 높이 0.5m에서 1706.4 lux 이었고, 광 파이프가 길어짐에 따라 조도값이 감소하여 Light pipe의 높이가 2.0m 일 때 최대 조도값은 886.7 lux를 보였다. 이는 광 파이프의 직경이 0.8m인 경우 보다 전체적으로 조도값이 증가한 것을 보여준다. 그리고 높이가 2.0m일 때도 생활하기에 충분한 조도값이 나오며 이는 태양 빛이 유입되지 않는 지하실 등에서 지상과 2.0m 이상의 거리를 두어도 일반적인 사무가 가능하다는 사실을 증명하는

것이다.

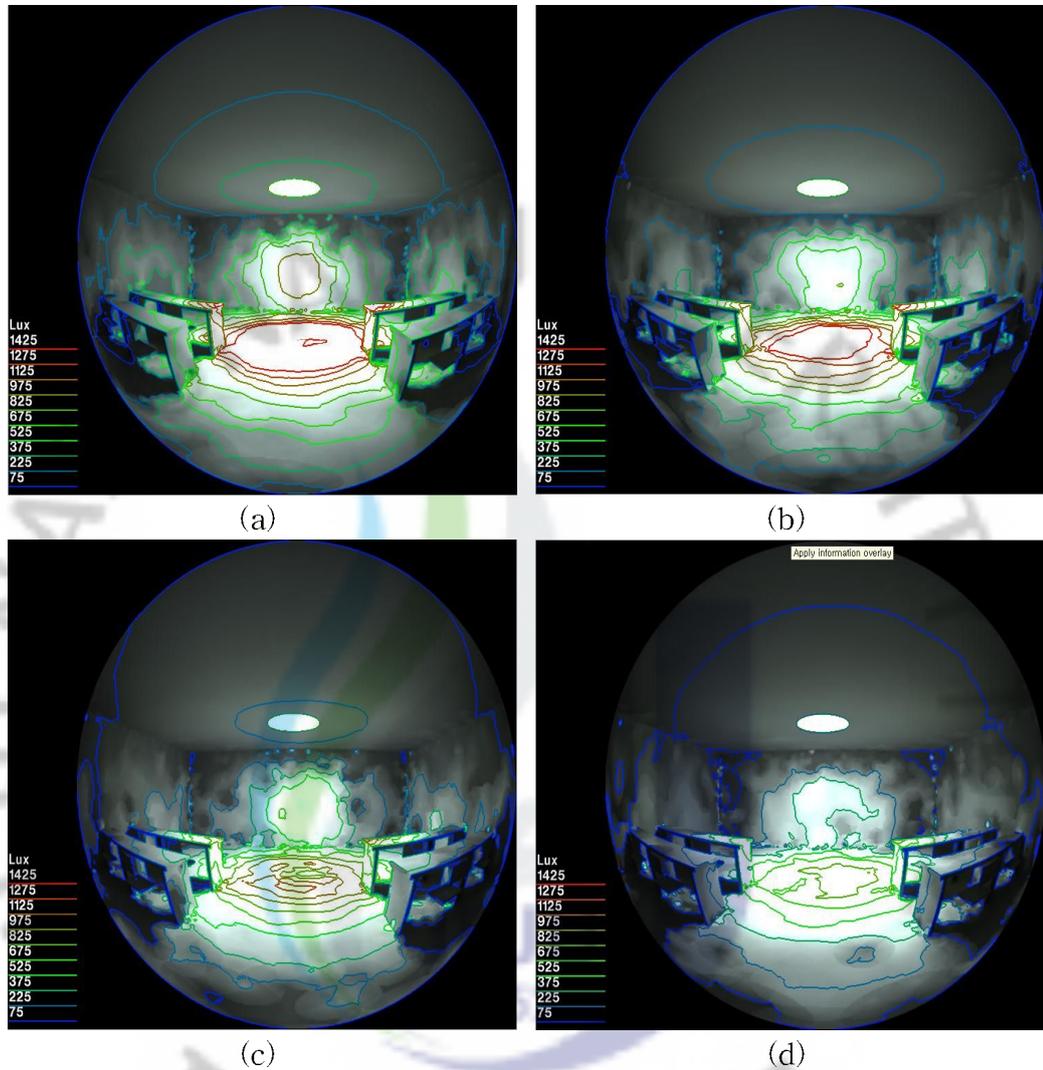


Fig. 22. Isolux lines of lightless space with a sun pipe system of 1.0m in diameter; (a) Light pipe of height 0.5m (b) 1.0 m (c) 1.5m (d) 2.0m

광 파이프의 직경이 1.0m일 때의 등조도선은 Light pipe의 높이가 0.5m일 때 약 1500 lux 이상인 조도가 가장 넓게 분포하고 있으며, 높이가 2.0m인 경우에는 약 975 lux이하의 조도값이 무창 공간 내에 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 23. Average illuminance variation with diameter and length of a sun pipe system

Fig. 23은 광 파이프의 직경과 높이를 달리 하였을 경우 평균 조도값의 변화를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과 광 파이프의 직경이 1.0m, Light pipe의 높이가 0.5m일 때 가장 높은 조도값을 보이며, 직경이 줄어들고 높이가 높아질수록 조도값이 감소함을 알 수 있다. 그리고 조도값을 비교하여 보면, 광 파이프의 직경이 1.0m일 때는 높이가 2.0m까지 증가하여도 평균 750 lux 이상의 수치를 보였고, 직경이 0.6m인 경우에는 Light pipe의 높이를 0.5m로 설계하여도 평균 조도가 250 lux 정도인 것을 알 수가 있다. 이는 실제 사무를 위한 조도값이 400~800 lux 이기 때문에 직경이 0.6m인 광 파이프인 경우에는 생활에 적합하지 않은 수치를 보였다고 판단할 수 있다.

본 연구는 태양고도가 가장 높은 6월 22일(하지) 낮 12시를 적용하여 시뮬레이션한 것이다. 따라서 계절, 시간이 바뀔 경우 본 연구에서 보인 결과값보다 낮은 수치를 보일 것이며, 실제 사무 환경의 필요 조도보다 낮게 될 것이다. 이에 따라 태양고도가 낮은 겨울이나 밤에는 인공조명을 보조적으로 사용하여 사람이 생활 가능한 조도 환경을 만들어야 할 것이다.

3. 소결론

자연채광시스템은 조명의 보조적인 역할로써 에너지 절약효과 뿐 아니라 향상된 시환경을 제공한다. 자연채광이 잘 설계된 건물은 일광의 증가 수준에 따라 최대 70%까지 조명 부하를 줄일 수 있다.

본 연구에서는 ECOTECT과 RADIANCE 프로그램을 활용하여 시뮬레이션하였다. 첫 번째 시뮬레이션으로 광 파이프 기본 성능 분석을 하였으며 시뮬레이션은 광 파이프 시스템이 설치되어 있지 않은 경우, Diffuser의 유무를 비교하여 분석하였다. 광 파이프는 직경을 0.8m, Light pipe의 높이를 1.0m로 설정하였다. 그리고 두 번째 시뮬레이션에서는 광 파이프의 직경을 0.6, 0.8, 1.0m, Light pipe의 높이를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0m로 변경하여 최적의 광 파이프 형상을 찾기 위해 시뮬레이션을 진행하였고, 이에 대한 결과는 다음과 같다.

(i) 광 파이프의 기본 성능 시뮬레이션

광 파이프 시스템을 미적용하였을 때, Diffuser를 미적용한 광 파이프 시스템 모두 조도 분포가 한곳으로 집중되는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 광 파이프 시스템의 Diffuser를 통해 생활에 적합한 조도 분포가 이뤄져야 함을 알 수 있다. Diffuser를 적용한 광파이프 시스템의 경우, 광 파이프를 설치한 지점으로부터 바닥면 부분이 실제 사무 환경에 적합한 조도인 400~800 lux의 값으로 골고루 분포됨을 알 수 있었다.

(ii) 광 파이프의 최적화 시뮬레이션

시뮬레이션 결과 광 파이프의 직경이 1.0m, Light pipe의 높이가 0.5m일 때 가장 높은 조도값을 보이며, 직경이 줄어들고 높이가 높아질수록 조도값이 감소함을 알 수 있었다. 그리고 조도값을 비교해보면 광 파이프의 직경이 1.0m인 경우에는 높이를 달리하여도 실제 사무 환경에 적합한 조도가 측정되었고, 직경이 0.6m인 경우에는 Light pipe의 높이를 0.5m까지 낮게 하여도 생활에 적합하지 않은 조도값을 보였다.

본 논문에서 제시된 시뮬레이션 모델링 및 분석은 친환경 건축 설계 및 자연

채광 시스템의 기초 성능 평가 분야에서 기본 인프라가 될 것이라 생각하며 특히, Diffuser의 구현이 불가능한 ECOTECH에서 RADIANCE를 연동하여 빛 산란이 가능하게 했던 방법은 앞으로의 자연채광 시스템 분석에 영향을 미칠 것으로 기대된다.

또한, 광 파이프의 최적화 시뮬레이션에서 최대의 조도값을 보인 시스템은 직경이 가장 넓고(1.0m), 높이가 가장 짧음(0.5m) 시스템인 것을 알 수 있었는데, 직경이 넓게 되면 경제적, 공간적 제약이 따르게 되고, 높이가 짧게 되면 깊이가 있는 지하나 창고 등에 적용하지 못하게 된다. 따라서 광 파이프 설계 시 본 시뮬레이션의 데이터를 토대로 밝기(조도)와 위에서 언급한 문제점에 관한 고려가 필요할 것이다. 그리고 광 파이프의 직경을 줄이거나 높이를 길게 할 경우에는 조도값이 감소하기 때문에 채광부(Dome)에서 집광 효율을 높이거나, 인공조명을 보조적으로 설치해 실제 생활 가능한 조도 환경을 만들어야 할 것이다.

IV. 열음향 레이저의 개발

1. 실험 장치 및 방법

1.1 실험 장치

1) 열음향 레이저 시스템(Thermoacoustic Laser System)

본 연구에서 사용한 열음향 레이저 시스템은 직접적으로 전기적 에너지를 음향 에너지로 변환시켜주는 장치이다. 열음향 레이저 시스템은 스택, 공명튜브, 가열을 위한 니크롬선, 구리선, 스택 주변(가열, 냉각 면)의 온도와 실내 온도를 측정하기 위한 K타입의 열전대(Thermocouple)로 구성된다. Fig. 24는 본 열음향 레이저장치의 모습이다.



Fig. 24. Thermoacoustic laser(TAL) system

(a) 스택(Stack)

스택은 열음향 레이저에서 열을 공급하고 단열재 역할을 하여 온도 구배를 높게 함으로써 음향파 발생의 효율성 향상시킨다. 따라서 열음향 레이저 시스템의 핵심요소라 할 수 있다. 스택은 단열을 고려하여 세라믹을 재료로 사용하였으며

기하학적 형태는 ‘Honey-comb’이다. 길이와 직경은 각각 25mm, 20.2mm이고 내부에는 약 0.81mm^2 의 수많은 채널을 갖고 있다.

Fig. 25를 보면 알 수 있듯이 스택의 한쪽 면에 3mm 정도의 홈을 파서 니크롬선을 구부려 삽입하고 채널(구멍)을 통해 삽입된 구리선과 연결하여 니크롬선을 가열시켰다. 그리고 K타입의 열전대(Thermocouple)를 스택의 양쪽 면에 위치시켜 스택 주변의 가열파트, 냉각파트의 온도구배를 측정 가능 하게 하였다.

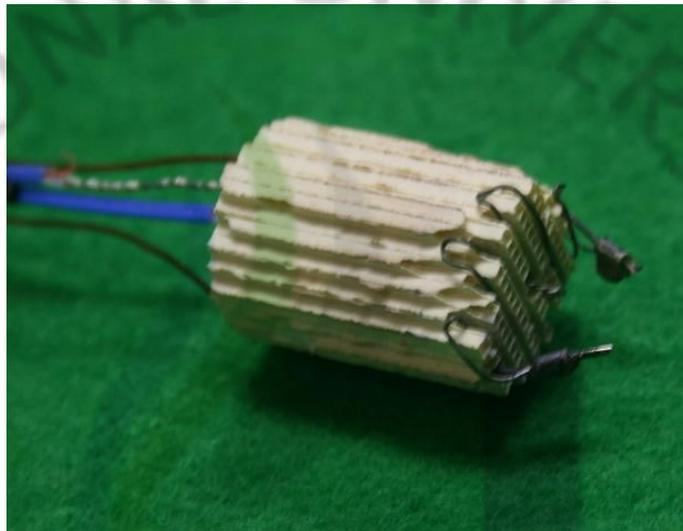


Fig. 25. Photograph of a stack

(b) 공명 튜브(Resonance Tube)

공명 장치는 음향파가 공명하기 위해 직접적으로 정규모드를 제공하기 위해 필요하다. 그리고 음향 에너지를 저장하고 음압 또는 체적 유량(Volume flow rate)의 진폭 또는 위상을 변화시키기 위해 필요하지만 음향파위의 저항 손실을 유발한다. 따라서 공명튜브 설계의 주요 요소는 음향파위의 손실을 최소화 하는 동시에 요구되는 공명 주파수를 유지하는 것이다.

본 연구에서의 공명튜브는 내경 20.2mm, 두께 2.4mm, 길이 200mm의 강화유리인 Pyrex 튜브를 사용하였고, 한쪽 끝이 막힌 튜브로써 Sondhauss 튜브와 비슷한 형상을 하고 있다. 즉, $v/4L$ 의 기본 진동수를 가지며, 열린 면은 음향파가 발생하는 면이고 닫힌 면 부분은 현재 니크롬선 저항을 통해 가열을 시켜주고

있지만, 추후에는 집광된 태양열을 조사할 부분이다.

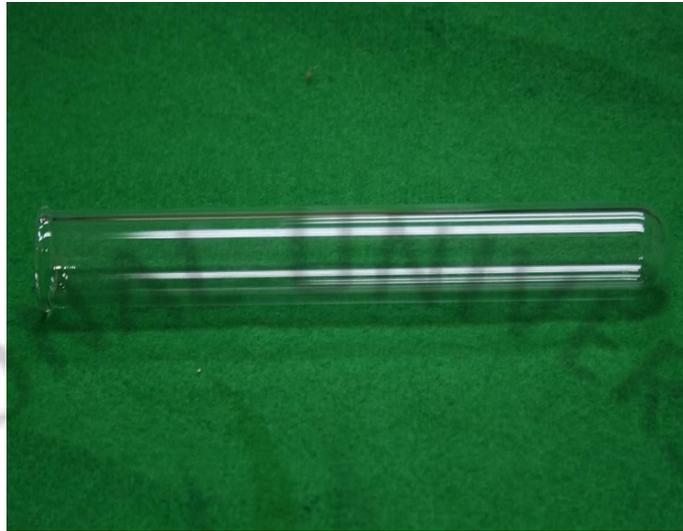


Fig. 26. Photograph of a resonance tube

2) 음향파 분석기(Acoustical analyzer)

열음향 레이저(TAL)에서 나오는 음향파의 특성을 측정하기 위해 리히텐슈타인 NTI audio 사에서 개발된 AL1 Acoustilyzer를 음향파의 음압 및 주파수를 측정하는데 사용하였다.

Fig. 27은 실험에 사용된 음향 분석기이며 외장 마이크는 오른쪽의 모습과 같이 막대 형태를 하고 있다. 본 기기는 다양한 음향파의 특성 측정 가능하고 휴대성이 용이하며, 비교적 오차가 적기 때문에 널리 사용되고 있다. 음압 측정 범위는 30-130dB 이고, 주파수의 측정 범위는 10Hz - 20kHz 이다. Table 4는 본 기기의 제품사양을 보여주고 있다.

- 음향파의 음향강도(SPL: Sound Pressure Level)

사람이 들을 수 있는 음향신호의 강도는 10^{-12}W/m^2 에서 1W/m^2 범위에 달하기 때문에 1에서 1조에 달하는 음의 세기 등급 척도가 필요하다. 이러한 음향 강도의 척도는 10진법 지수 축척을 사용하여 가청음의 강도 구간을 12등급으로 나

누어 그 눈금 단위는 벨(Alexander Graham Bell, 1847~1922)을 기념하여 B로 표기하고 벨이라 한다. 이 눈금 사이를 10등분하여 음의 세기를 데시벨(decibel:dB) 등급으로 표시한다. 데시벨 단위를 사용하여 음의 세기와 음압의 높이를 기준 세기 및 기준 음압에 대한 상대 준위로 나타낸다. 음의 세기 레벨 SIL은

$$SIL = 10\log(I/I_{ref})(dB) \quad (20)$$

$I = p^2/\rho_0 c_0$ 이기 때문에 음압 레벨 SPL은 다음과 같다.

$$SPL = 20\log(p/p_{ref})(dB) \quad (21)$$

기준음의 세기는 사람이 들을 수 있는 최저 세기 $10^{-12}W/m^2$ 을 택하고 이에 해당하는 공기 중 평균 음압 $20\mu Pa(20 \times 10^{-6}W/m^2)$ 을 기준 음압으로 택하면 $1W/m^2$ 의 소리세기 레벨은 120dB이다.



Fig. 27. Acoustic analyzer for measuring characteristics of acoustic waves

Table 3. Specification of acoustic analyzer

Specification	
Sound Pressure Level	L_{eq} , short-time L_{eq} , L_{min} , L_{max} Dynamic range (using MiniSPL): 30 - 130 dBSPLA
Real Time Analyzer	1/3 or full octave band resolution, class 0 filters
Delay Time	Resolution < 0.1 ms, max time: 1 s
Frequency	Range: 10 Hz to 20 kHz Resolution: 4 digits Accuracy: < ± 0.1 %
Display	Graphic LCD 64 x 100 pixel, with backlight
Batteries	3x AA batteries (alkaline) Typical battery lifetime > 16 hours
Dimensions	163 x 86 x 42 mm (6.4" x 3.38" x 1.63")
Weight	300 g (10.5 oz) incl. batteries
Temperature	0° to +45° C (32° to 113° F)
Humidity	90 % R.H., non condensing

3) 온도 측정 장치 및 파워 서플라이

(a) K타입 열전대 및 데이터 수집 장치

본 실험에서는 온도를 측정하기 위해 K타입의 열전대(Thermocouple)를 활용하여 스택 주변의 온도(Heating end, Cooling end) 및 실내 온도를 측정하였다.

이에 대한 수집 장치로서 널리 보편화되어 있는 Agilent사의 34970A 계측기를 사용하였다. 3슬롯 메인프레임으로 이루어져 있고, 내장형 GPIB와 RS-232 인터페이스, 전압, 온도를 측정할 수 있는 20개의 채널과 전류를 측정할 수 있는 2개의 와이어 채널이 내장되어 있으며 초당 최대 250채널 스캐닝이 가능하다.



Fig. 28. Photograph of data logger(34970A)

(b) 전원 공급기(DC power supply)

전원 공급 장치는 열음향 레이저에서 스택의 한쪽 면을 가열 시켜주는 역할을 한다. 구리선을 통해 적절한 DC전원을 공급시켜 주면 니크롬선의 저항을 유발시켜 스택의 가열 면이 가열되게 되며 음향파를 발생시키는 열원이 된다.

전원 공급 장치로써 한국 이지 디지털(EZ digital)사의 GP-4303DU를 사용하였다. GP-4303DU는 최대 30V, 3A까지 전원 공급이 가능하며 출력안정도 5mV (전압원에 대하여)의 값을 갖는다.

본 실험에서는 Power(온도)에 따른 음향파 특성 측정을 제외하고 25W의 전원을 공급하여 실험을 수행하였다. 추후에는 전원 공급 장치 대신 태양열이나 폐열을 열음향 레이저의 열원으로 활용할 계획이다.



Fig. 29. Photograph of power supply

1.2 실험 방법

본 연구의 최종목적은 태양열과 폐열을 이용하여 열음향 레이저(TAL) 개발을 위한 기본 성능 분석 실험이다. 이에 따라 열음향 레이저의 기하학적 형상 및 Power 등을 변수하여 음압 및 주파수에 대한 최적화된 단일 열음향 레이저의 기하학적 형상을 제시하였다.

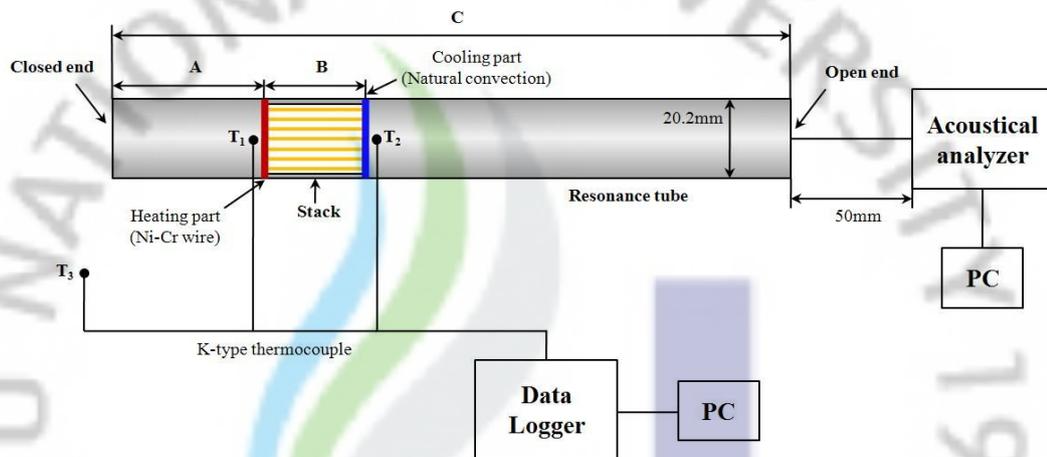


Fig. 30. Schematic of thermoacoustic laser system

Fig. 30은 본 실험의 장치 및 구성의 개략도이다. 전원공급기(DC Power supply)는 스택의 닫힌 면 쪽의 표면을 니크롬선을 통해 가열시켜주며 스택의 채널을 통해 음향파가 이동하게 된다. 이에 따라 공명 튜브의 정규 진동수와 일치하게 되면 소리가 발생하게 된다. 음압은 튜브의 열린 면 쪽에 5cm의 거리에서 음향분석기(Acoustical analyzer)로 1초 간격으로 측정하였고, 온도 역시 Data logger를 이용해 온도 구배 및 실내온도를 1초 간격으로 측정하였다. 열음향 레이저에서 음향파가 발생하게 되면 온도가 증가하여도 실험 시작(전원공급) 후 약 1분정도 경과하면 일정한 음압을 유지하기 때문에 모든 실험은 3분 동안 진행되었다.

본 논문에서는 스택의 직경(공명튜브의 직경), 스택의 재질 및 형상을 고정 변

수로 두고 스택의 위치(A), 길이(B), 공명 튜브의 길이(C), 그리고 공급전원을 달리하여 실험을 진행하였다. 스택 및 튜브의 내경은 20.2mm로 고정하였고, 스택은 약 0.81mm²의 넓이의 다수의 사각형 형상의 채널이 들어있는 ‘벌집모양(Honey comb)’ 세라믹 스택을 사용하였다.

Table 4는 본 실험의 실험 조건들을 보여주고 있다. Case 1은 스택의 위치(A)를 1~10cm까지 변경하여 최대의 음압이 발생하는 위치를 알아보기 위한 것이다. Case 2는 스택의 길이(B)를 12.8, 25.6, 51.2mm로 바꾸어가며 스택의 길이가 바뀔 경우, 이에 따라 스택 주변의 온도 구배가 가장 영향을 받기 때문에 온도 구배와 음압과의 관계를 확인하고자 하였다. Case 3은 공급전압(온도)을 변화시켰을 때 음향파를 분석하기 위한 실험이며 Power를 25, 30, 35W로 변경하여 실험하였다. Case 4는 튜브의 길이(C)에 따라 달라지는 음향파 진동수를 측정해 보는 것이 주목적이며, 튜브의 길이(C)에 따라 최적의 음압을 나타내는 스택의 위치도 바뀔 수 있는 것을 고려하여 튜브의 닫힌 면에서 1, 3, 5, 7, 9cm로 스택의 위치를 바꾸어가며 실험을 진행하였다.

Table 4. Experimental conditions to find the optimum design(geometric)

	A(cm)	B(mm)	C(mm)	Input power(W)
Case 1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	25.6	200	25
Case 2	5	12.8, 25.6, 51.2	200	25
Case 3	5	25.6	200	25, 30, 35
Case 4	1, 3, 5, 7, 9	25.6	150, 200, 250	25

2. 결과 및 고찰

2.1 스택의 위치에 따른 음향파 분석

한쪽 끝이 닫히고 다른 쪽 끝이 열린 공명 튜브 시스템에서는 음속이 최대가 되는 지점이 가장 효과적인 스택의 위치이며 이 위치는 닫힌 면에서 $1/3$ 지점임을 2006년 Donald Fahey는 자신의 연구에서 나타내었다[Donald Fahey, 2006]. 하지만 1995년 Bess HE는 $1/2 \sim 1/4$ 지점이 최적의 위치라고 설명하였다[Bess HE, 1995]. 2002년에 G. W. Swift는 자신의 저서에서 v (입자의 속도)를 낮게 유지 하여 점성 손실을 감소시키는 것(고효율)과 입자의 속도를 높게 하여 출력을 증가시키는 것(고출력)을 합리적으로 조합하여야 하며, 닫힌 면에서 약 $\lambda/20$ 지점에 위치시키면 된다고 밝혀내었다[G. W. Swift, 2002].

각각의 연구마다 최적의 위치가 조금씩 다르기 때문에 실험적인 증명과 본 열음향 레이저의 기하학적 형상에 맞는 최적의 스택 위치를 찾기 위해 실험이 요구되었다.

음향파의 주파수는 스택의 위치에 관계없이 일정하게 500Hz로 발생되었다.

Fig. 31. Maximum and average SPL with stack position

본 연구에서 사용한 열음향 발생장치의 기하학적 구조에서는 단힌 면으로부터 5cm에 스택이 위치하였을 경우 평균음압이 114.5dB로써 가장 높게 측정되었다. 이는 앞에서 언급한 기존 연구의 결과와 비슷하며, 본 열음향 레이저에서는 스택이 5cm 지점일 때 음속이 최대임을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 단힌 면으로부터 3cm 이내, 14cm 이후에는 음향파가 발생되지 않는다.



Fig. 32. Maximum temperature with stack position
(three minutes after supplying power)

Fig. 32는 전원 공급 시, 스택의 위치에 따른 가열 면에서의 표면 온도를 나타내고 있다. 실험의 데이터 수집은 3분간 이루어졌다. 그리고 위의 Fig. 32는 음향파가 발생하지 않은 구간에서는 최대 온도가 높지만, 음향파가 발생하는 구간에서는 최대 온도가 낮아짐을 보여주고 있다. 이는 열에너지가 음향파로 변환되었기 때문이고 이러한 현상은 열음향 레이저가 에너지를 변환시켜주는 시스템이라는 것을 증명하는 하나의 예라 할 수 있다.

Fig. 33. Onset time of acoustic waves with stack position

Fig. 33을 보면 발생 시간은 7cm~9cm에서 가장 짧다. 최대의 음압은 5cm지점에 위치하였을 때 발생하지만 발단시간은 다른 지점에서 더욱 짧아지는 사실을 통해 음압의 크기와 발생 시간은 상관관계가 적다는 것을 알 수 있다. 이는 스택의 위치에 따라 최적의 속도인 지점과 점성 및 열적 손실의 영향이 최대로 미치는 지점이 다르기 때문이다. G. W. Swift의 저서를 보면 이를 수학적으로 증명하고 있다[G. W. Swift, 2002].

Fig. 34. Onset temperature of acoustic waves with stack position

Fig. 32, Fig. 33과 Fig. 34의 그래프가 거의 비슷한 형태를 하고 있기 때문에, 발단시간이 짧을수록 발단 온도 구배 및 최대 온도가 낮아진다는 상관관계를 알 수 있다. 튜브의 단힌 면에서 8cm 만큼 떨어 졌을 때 발단 온도 구배가 가장 낮은 현상에서 비춰볼 때 이 그래프 역시 음향파 발생에 영향을 주는 인자는 온도 구배만이 아니라 스택의 위치도 주요하게 작용하는 것을 알 수 있다.

그리고 가열 면의 온도 및 온도 구배 변화는 비슷한 양상이다. 이는 가열 면의 온도의 증가율이 냉각 면의 증가율보다 상대적으로 높기 때문에 온도구배(가열 면의 온도와 냉각 면의 온도 차)의 그래프 모양이 가열 면의 온도 그래프 모습과 거의 비슷하게 되는 것이다. 하지만 스택의 길이가 충분히 짧게 되면 열전달이 잘되어 온도구배가 낮게 되고, 따라서 Fig. 34의 그래프와 다른 모습을 보이게 된다.

Fig. 35. Temperature gradient and SPL of generated acoustic wave
(stack position: 5cm from closed end)

Fig. 35는 스택의 위치가 닫힌 면에서 5cm 지점에 위치했을 때 발생한 음향파의 음압과 온도 구배를 나타낸 그래프이다. 음향파는 전원 공급 후 17초경과 후 발생하였으며 이때 온도구배는 약 200℃이었다. 즉, 정상파가 형성되어 더 이상 크기가 증가되지 않는다. 이때부터 온도구배가 계속 증가하더라도 발생하는 음압은 일정한 값을 가지고 지속된다는 사실을 알 수가 있다.

2.2 스택의 길이에 따른 음향과 분석

스택은 음향장(Acoustic field)이 크게 변하게 하지 않게 하기 위하여 파장에 비해 충분히 짧아야 한다. 만약 스택 길이가 증가하게 되면 점성과 열적 손실이 그만큼 증가하므로 열음향의 효율이 상당히 감소한다. 하지만, 스택 길이가 증가함에 따라 온도 구배와 더 높은 음향 출력을 얻을 수 있기 때문에, 최적의 스택길이는 이 영향을 고려하여 얻을 수 있게 된다는 이론적 원리를 J.J.M.Slot이 2009년 자신의 저서에서 설명하였다[J.J.M. Slot, 2009].

이에 따른 실험적 데이터를 얻기 위해 스택의 길이를 변경해가며 최적의 음압을 나타내는 길이를 찾고자 실험을 진행하였다.

스택의 길이를 변화시켰을 경우에도 음향파는 500Hz의 주파수로 일정하게 발생하였다.

Fig. 36, Fig. 37, Fig. 38은 각각 스택의 길이에 따른 가열 면의 온도 변화, 온도 구배 변화, 냉각 면의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 스택의 길이가 51.2mm일 때 가열 면의 온도와 스택의 온도 구배가 가장 높게 측정 되었다. 또한, 스택의 길이가 12.8mm일 때 온도 구배가 가장 완만하였다.

스택의 길이 12.8mm일 때는 스택이 짧으므로 점성과 열적 손실이 적게 작용하여 열전달이 잘되기 때문에 온도 구배가 작아지게 된다. 따라서 가열 면의 최대온도도 스택 길이가 25.6mm 일 때 보다 절반 정도로 감소하게 된 것이다. 스택의 길이가 51.2mm인 경우에는 스택의 길이가 길기 때문에 열전달이 잘되지 않아 온도 구배가 크고 가열 면의 최대온도가 증가한 것이라 생각할 수 있다.



Fig. 36. Temperature variation of heating end of stack with different stack lengths

Fig. 37. Variation of temperature gradient with different stack lengths



Fig. 38. Temperature variation of cooling end of stack with different stack lengths

Fig. 39. Maximum and SPL of acoustic waves with different stack lengths

스택의 길이가 25.6mm 인 경우 12.8mm 보다 평균 음압이 1dB 정도 더 높게 발생하였고 스택의 길이가 51.2mm일 때 음향파가 발생되지 않았다.

이는 앞에서 언급한 것처럼 스택의 길이가 12.8mm인 경우 점성과 열적 손실이 적지만 온도 구배가 25.6mm에 비해 작기 때문에 온도 구배가 손실보다 영향을 더 많이 주어 25.6mm 일 때보다 음압이 작게 나온 것이라 생각할 수 있다. 그리고 51.2mm인 경우에는 스택이 길기 때문에 온도 구배는 크지만 점성과 열적 손실이 보다 커지게 되어 음향파가 발생하지 않은 것으로 판단된다. 그리고 51.2mm는 튜브에서 음향장을 변화 시킬 정도로 충분히 커서 음압이 발생되지 않은 것으로도 볼 수 있다.

Fig. 40, 41을 보면 스택의 길이가 12.8mm 일 때 음압은 8초 후에 발생되었으며 발생 시의 발단 온도 구배는 약 53°C 정도임을 알 수 있다. 25.6mm인 경우에는 음압이 17초 지나서 발생되었으며 발단 온도 구배는 약 200°C 정도이다. 그리고, 일정한 발단 온도 구배 이상이 되면 온도 구배가 증가하여도 음압은 증가하지 않고 일정한 값을 지속하는 것을 알 수 있다.



Fig. 40. Temperature gradient and SPL of generated acoustic wave with stack length of 12.6mm

Fig. 41. Temperature gradient and SPL of acoustic wave with stack length of 25.6mm

2.3 Power(온도)에 따른 음향과 분석

Fig. 42. Temperature variation of heating end of stack with different input powers

Fig. 42는 공급전원(Power)의 크기를 변화시켰을 때 시간에 따른 온도 변화를 보여 주고 있다. 25W인 경우에는 430°C 정도 까지 온도가 상승하였으며 30W일 때는 약 500°C 까지 온도가 증가하였다. 그리고 35W일 때는 3분후에 531°C까지 증가하였다. 그리고 Fig. 43은 세 종류의 Power에 따른 온도 구배 그래프로써 가열 면의 온도변화(Fig. 42)와 비슷한 양상을 하고 있다. 이는 이전의 실험결과에서 알 수 있듯이 가열 면의 온도 증가가 상대적으로 냉각 면의 온도 증가 보다 크기 때문에 가열 면의 그래프와 비슷하게 증가하는 것이다. Fig. 44은 Power에 따른 음압변화를 나타내고 있으며 25W일 때 평균음압은 114.54dB, 30W일 때는 116.61dB, 35W일 때는 117.29dB이었다. 그리고 이러한 수치로 보아 25W에서 30W로 증가했을 때가 30W에서 35W로 증가했을 때보다 음압 증가량이 더 높은 것을 알 수가 있다. 즉, 일정하게 Power를 증가시켜도 발생하는 음압은 이에 비례하여 증가하지 않는다는 것을 의미한다.



Fig. 43. Variation of temperature gradient with different input powers

Fig. 44. Maximum and average SPL of acoustic waves with input power

최대 음향파의 음압을 발생시켜 열음향 레이저를 활용할 경우에는 전원을 높게 하여 공급해야 한다. 하지만 본 실험 결과를 통해 공급전원을 높였을 때 그만큼 음향파가 비례하여 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 실험의 변수들 중에서 30W의 공급전원을 가해주는 것이 효율성이 가장 높은 변수라 할 수 있다. 따라서 추후 열음향 레이저 시스템 설계 시, 얻고자 하는 음향파의 음압과 이에 대한 공급전원에 대해 효율성을 사전에 분석해 보아야 할 것이다.



Fig. 45. Onset time of acoustics with according to input power

Power에 따른 발단 시간은 25W일 때 17초, 30W일 때 10초, 35W일 때는 9초였다. 이 같은 결과 값으로 보아 파워가 증가함에 따라 음향파는 더 빨리 발생하게 된다. 하지만 25W에서 30W로 변경하였을 때는 7초가 단축됐지만 30W에서 35W로 증가 시켰을 경우에는 단 1초만이 단축되었다. 이 그래프 역시 30W 이상의 전원을 공급하는 것은 비효율적이라는 사실을 증명해준다.

Fig. 46. Temperature gradient and SPL of acoustic wave with input power of 25W

Fig. 46, Fig. 47, Fig. 48은 각각의 공급전원(Power)에 따른 발생된 음압 및 온도 구배를 보여주고 있다. 25W에서는 약 200℃, 25W에서는 약 250℃, 35W에서는 약 320℃정도에서 음압이 발생한 것을 알 수가 있다. 즉, 특정한 온도 구배 절대치에서 음압이 발생하지 않으며 파워가 증가함에 따라 발단 온도 구배가 증가한다는 규칙성을 나타내는 것을 의미한다.

이러한 현상이 나타나게 된 이유는 Power가 올라감에 따라 음향파는 발생은 빨라지는 경향을 보이지만 더욱 급격하게 증가하는 온도 때문에 상대적으로 음향파 발생이 늦어지기 때문에 측정된 온도 구배값은 더 증가하는 것이다.

따라서 음향파를 발생시킨다는 직접적인 이유가 온도 구배이지만, 음향파를 발생시키고자 할 때, 기하학적 형상 등이 관계하여 영향을 미치고 있다는 사실을 고려해야 한다.



Fig. 47. Temperature gradient and SPL of acoustic wave with input power of 30W

Fig. 48. Temperature gradient and SPL of acoustic wave with input power of 35W

2.4 튜브의 길이에 따른 음향파 분석

식(8)을 보면 열음향 레이저에서 나오는 주파수는 튜브의 길이와 음속에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 하지만 음속은 아래와 같이

$$v(m/s) = 331.5 + 0.6T \quad (22)$$

식으로 표현된다. 여기서 T 는 튜브 내의 공기 온도($^{\circ}\text{C}$)이다. 식에서 알 수 있듯이 음속은 온도에만 영향을 받기 때문에 열음향 레이저에서 나오는 주파수를 결정하는 것은 튜브의 길이와 튜브내의 온도라고 재 정의할 수 있다. 하지만 식(22)를 따르면 온도는 0.6배로 주파수에 증가시키지만 튜브의 길이는 4배로 주파수를 감소시키기 때문에 주파수에 가장 큰 영향을 주는 것은 튜브의 길이라고 할 수 있다.

Fig. 49. Sound pressure level of acoustic waves with different lengths of resonance tube and stack position

Fig. 49를 보면 알 수 있듯이, 튜브의 길이가 150mm일 때는 스택의 위치가 1cm, 9cm, 튜브의 길이가 200, 250mm일 때는 1cm, 3cm인 경우에 음향파가 발생하지 않았다. 그리고 세 종류의 튜브 모두 5cm에서 최대의 음압이 발생 했음을 알 수가 있다. Fig. 50은 각각의 튜브에서 최대의 음압이 나오는 스택의 위치 (5cm)에서의 최대, 평균 음압값을 그림으로 표현한 것이다.

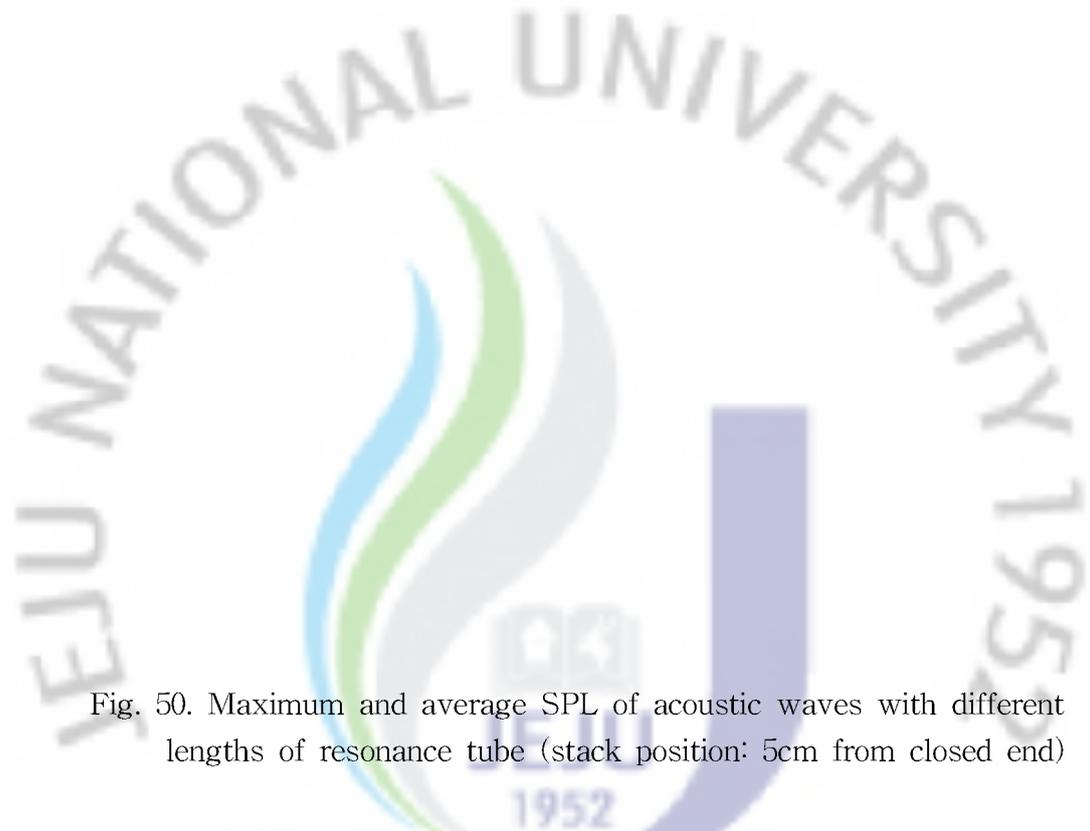


Fig. 50. Maximum and average SPL of acoustic waves with different lengths of resonance tube (stack position: 5cm from closed end)

튜브의 길이가 150mm일 때 음압은 115.7dB, 200mm일 때 114.46, 250mm일 때 112.65dB이 발생되었다. 이는 다른 공명 튜브의 길이에 같은 양의 전원을 공급하기 때문에 길이가 짧은 튜브일수록 점성 및 열적 손실이 적기 때문이라고 판단된다. Fig. 51, Fig. 52는 스택의 위치가 닫힌 면에서 5cm에 위치하였을 때 튜브의 길이에 따라 달라지는 온도 구배 및 최대온도를 나타내고 있다. 이와 같은 이유는, 튜브가 150mm인 경우는 점성 및 열적 손실이 적기 때문에 가열 면과 온도구배가 높은 것이고, 튜브가 250mm인 경우는 음향파가 발생하지 않아 열에너지가 음향에너지로 변화되지 않았기 때문에 높은 것이라고 볼 수 있다.



Fig. 51. Variation of temperature gradient with different lengths of resonance tube

Fig. 52. Temperature variation of heating end of stack with different lengths of resonance tube

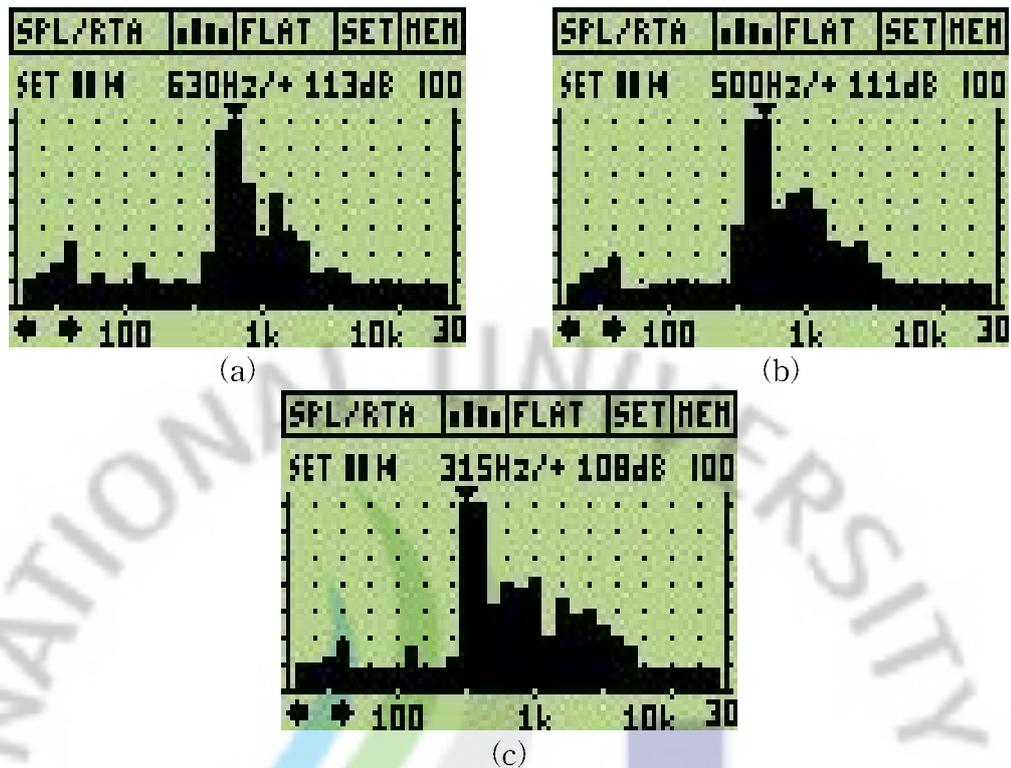


Fig. 53. Frequencies measured with different lengths of resonance tube
 (a) 150mm (b) 200mm (c) 250mm

주파수는 튜브의 길이가 150mm일 때 630Hz, 200mm일 때 500Hz, 250mm일 때 315Hz를 보여주고 있다. 앞에서 언급한 것처럼, $L = \lambda/4 (f = \frac{v}{4L})$ 에 의해 튜브의 길이가 길어짐에 따라 주파수는 감소하고 파장은 길어지는 경향을 보였다. 따라서 초음파나 초저주파 등 주파수와 목적으로 하는 열음향 레이저를 개발할 경우, 튜브의 길이와 튜브 내의 공기온도를 고려해야 하며, 특히 튜브의 길이를 주요인자로 두어 개발하여야 효과적이고 최적화된 열음향 레이저를 제작할 수 있다.

3. 소결론

본 연구에서는 태양에너지를 열원으로 적용하기에 앞서 전원을 공급하여 열음향 레이저의 기하학적 형상에 따라 발생하는 음향파의 성질(음압, 주파수)을 분석하기 위한 단일 튜브 기초성능 실험을 수행하였다. 이를 통해 열음향 레이저 시스템의 최적 조건을 찾고자 하였다.

이에 따라 스택의 위치, 길이, 공명 튜브의 길이, 그리고 공급전원을 달리하였고, 스택의 직경(공명튜브의 직경), 스택의 재질 및 형상을 고정 변수로 두어 실험을 진행하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

(i) 길이가 20cm인 공명튜브에서는 스택의 위치가 닫힌 면에서 5cm에 위치시켰을 때 최적의 음향 강도와 음압이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 스택의 위치에 따라 최적의 속도인 지점과 점성 및 열적 손실의 영향이 최대로 미치는 지점이 다르기 때문이다. 튜브내의 온도를 분석한 결과 음향파가 발생했을 때 가열 면의 온도가 낮아졌고, 음향파가 발생하지 않을 때는 온도가 상대적으로 낮은 것으로 비춰보아 열음향 레이저가 에너지를 변환시켜주는 시스템이라는 증명할 수 있었다.

(ii) 스택의 길이가 25.6mm 인 경우 12.8mm 보다 평균 음압이 1dB 정도 더 높게 발생하였고 스택의 길이가 51.2mm일 때 음향파가 발생되지 않은 것을 알 수 있다. 이는 스택의 길이가 12.8mm인 경우 점성과 열적 손실이 적지만 온도 구배가 25.6mm에 비해 작기 때문에 온도 구배가 손실보다 영향을 더 많이 주어 25.6mm 일 때보다 음압이 작게 나온 것이라 생각할 수 있다. 그리고 51.2mm인 경우에는 스택이 길기 때문에 온도 구배는 크지만 점성과 열적 손실이 보다 커지게 되어 음향파가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

(iii) Power에 따른 음압변화에 관한 실험 결과 값은 25W일 때 평균음압은 114.54dB, 30W일 때는 116.61dB, 35W일 때는 117.29dB이었다. 이는 일정하게 Power를 증가시켜도 발생하는 음압은 이에 비례하여 증가하지 않는다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 따라서 본 실험의 변수들 중 35W의 공급전원을 가해질 경우 최대의 음압이 발생하였지만 30W가 효율성이 가장 높은 것이라고 할 수

있다. 그리고 추후 열음향 레이저 시스템 설계 시, 얻고자 하는 음향파의 음압과 이에 대한 공급전원에 대해 효율성을 사전에 분석해 보아야 할 것이다.

(iv) 튜브의 길이가 150mm일 때 음압은 115.7dB, 200mm일 때 114.46, 250mm일 때 112.65dB이 발생되었다. 따라서 튜브의 길이가 증가함에 따라 음압이 감소함을 알 수 있었다. 이와 같은 이유는 다른 공명 튜브의 길이에 같은 양의 전원을 공급하기 때문에 길이가 짧은 튜브일수록 점성 및 열적 손실이 적기 때문이라고 판단된다. 주파수는 튜브의 길이가 150mm일 때 630Hz, 200mm일 때 500Hz, 250mm일 때 315Hz의 음향파가 발생되었다. 이는 $L = \lambda/4 (f = \frac{v}{4L})$ 에 의해 튜브의 길이가 길어짐에 따라 주파수는 감소하고 파장은 길어지는 경향을 보이기 때문이다.

위의 결론을 종합해보면, 스택의 위치는 200mm의 공명튜브에서는 닫힌 면에서 5cm 지점에 배치시켰을 때, 스택의 길이는 25.6mm일 때, 공급전원은 35W일 때 최대의 음압이 나왔음을 알 수 있다. 그리고 공명튜브의 길이는 150mm일 경우가 본 실험에서 최적의 길이였으며, 최대의 주파수도 튜브의 길이가 가장 짧을 때 발생된 것을 알 수 있었다.

따라서 음압과 주파수를 고려한 열음향 레이저 설계 시에는 위의 기하학적 변수들을 고려해야하며, 추후에 태양에너지 및 폐열을 열음향 레이저로 적용하기 위해서는 본 실험의 결과를 바탕으로 포커싱 등에 대한 후속 연구가 필요로 할 것이다.

V. 결 론

본 연구는 태양광의 선택적 적용이 가능한 복합 시스템을 개발하여 태양에너지 적용시스템에 대한 공간적 제약을 해소하고 효율성을 향상시키는 것이 최종 목표이다. 태양에너지의 복합 이용을 위하여 자연채광 시스템 중 광 파이프의 성능 시뮬레이션 및 최적의 열음향 레이저 개발과 관련한 내용을 중점적으로 다루고 있다.

자연채광 시뮬레이션에서는 ECOTECT와 RADIANCE 프로그램을 활용하여 시뮬레이션 하였다. 첫 번째 시뮬레이션으로 광 파이프 기본 성능 분석을 하였고 두 번째 시뮬레이션으로써 광 파이프의 직경과 높이를 달리하여 최대의 조도값을 보이는 최적의 광 파이프를 찾고자 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 분석 결과 Diffuser를 적용한 광 파이프 시스템의 경우, 실내 사무에 적합한 조도가 골고루 분포됨을 알 수 있었다. 그리고 광 파이프의 직경이 1.0m, Light pipe의 높이가 0.5m일 때 가장 높은 조도값을 보이며, 직경이 줄어들고 높이가 높아질수록 조도값이 감소함을 알 수 있었다.

열음향 레이저 개발에서는 추후 태양열 및 폐열에 적용하고자 단일 튜브 기초 성능 실험을 통해 열음향 레이저 시스템의 최적 조건을 찾고자 하였다. 이에 따라 스택의 위치, 길이, 공명 튜브의 길이, 그리고 공급전원을 달리하여 실험을 진행하였다. 실험 결과, 200mm의 공명튜브에서 스택의 위치는 단힌 면에서 5cm 지점에 배치시켰을 때, 스택의 길이는 25.6mm일 때, Power는 35W 일 때 가장 높은 음압이 나왔음을 알 수 있다. 하지만 공급전원이 35W인 경우 30W에 비해 효율성이 낮아졌다. 그리고 공명튜브의 길이는 150mm일 경우가 본 실험에서 최적의 길이였으며, 최대의 주파수도 튜브의 길이가 150mm일 때 발생된 것을 알 수 있었다.

본 연구는 추후 태양 에너지의 복합 이용 분야에서 기초 데이터로 활용될 것이라 생각되며, 앞으로도 활발한 연구를 통해 기존 전기에너지가 담당하고 있는 부하를 태양에너지로 대체해 나가야 한다. 특히, 자연채광 시스템과 TAL 시스템의 인테그레이션(Integration)기술 개발도 이루어져 통해 태양에너지의 효율을 극대화 시켜야 할 것이다.

참 고 문 헌

송규동, 2002, “RADIANCE 프로그램”, 대한건축학회 논문집 제 20권 제 1호, pp. 6-13.

Joel Callow, 2003, “Daylighting Using Light Guide Systems”, Thesis, University of Nottingham.

Dr. Christoph F. Reinhart, 2006, “Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design“, Institute for Research in Construction, 29 August.

Jitka Mohelnikova, Frantisek Vajkay, 2008, “Daylight simulations and tubular light guides”, International Journal of Sustainable Energy. 01 September.

M. Paroncini, F. Corvaro, G. Nardini, and S.Pistolesi, 2008, “The Experimental and Numerical Analysis of a Lightpipe using a Simulation Software”, World Academy of science, Engineering and Technology 40.

고동환, 2010, “Autodesk ECOTECH analysis 2010을 이용한 친환경 건축물 평가 및 분석”, 대한건축학회지, 54(7), pp. 56-60.

지철근 외, 2010, “최신 조명환경원론”, 문운당.

Harvard Design School, 2010, 6332 “Day-Lighting Buildings”, 4 December.

이종영, 정명순, 송규동, 2010, “자연채광 시스템을 이용한 학교교실의 시환경 개선 방안”, 한국건축친환경설비학회, 2010년 춘계학술발표대회, pp.231~234.

Rayleigh, L., 1945, "The Theory of Sound", 2nd. ed., Vol. 2, Sec. 322.

Carter, R. L., White, M. and Steele, A. M., 1962, Private communication of Atomics International Division of North American Aviation, Inc..

Bass HE, raspet R, Belcher JR, Brewster J., 1995, "A study of element interaction in thermoacoustic engines", Annual Report of ONR Grant # N00014-93-1-0077.

Yong Tae Kim, Min Gon Kim, 2000, "Optimum Positions of a Stack in a Thermoacoustic Heat Pump", J. of the Kor. Phy. Soc., 36(5), pp. 279-286.

G. W. Swift, 2002, "Thermoacoustics", Acoustical Society of America.

윤석왕, 김호철, 김민곤, 서상준, 김영환, 2003, "물리음향학Ⅱ", 아카넷.

N. Mohd. Ghazali, 2004, "Thermoacoustic Heat Engine", Journal Teknologi, 40(A) Jun., pp. 67-78.

Donal Fahey, 2006, "Thermoacoustic Oscillations", Wave Motion & Optics, pp. 1-9.

Kent AJ, Kini RN, Stanton NM, Henini M, Glavin BA, Kochelap VA, Linnik TL, 2006, "Acoustic phonon emission from a weakly coupled superlattice under vertical electron transport: observation of phonon resonance", Phys. Rev. Lett., 96, pp. 215504-1 to 4.

O. G. Symko, 2007, "Using sound to turn heat into electricity", NewsCenter, University of Utah, (a).

Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2008, "University Physics", Pearson.

Ryan Lampe, 2008, "Design and Testing of Rapid Prototyped Stacks for thermoacoustic Applications", Proceedings of The National Conference, April 12-14, pp. 1-8.

Yoshiyuki Tsuji, Shin-ichi Sakamoto, Takahiro Ishino, Yoshiaki Watanabe, and Jiro Senda, 2008, "How to Design a Thermoacoustic System Considering the Relaxation Time", The Japan Soc. of App. Phy., 47(5), pp. 4231-4234.

Konstantin I. Matveev, Najmeddin Shafiei-Tehrany, Cecilia D. Richards, 2008, "Small-Scale Thermoacoustic Engine Demonstrator", Proceedings of PowerMEMS, November 9-12.

Walker PM, Kent AJ, Henini M, Glavin BA, Kochelap VA, Linnik TL, 2009, "Terahertz acoustic oscillations by stimulated phonon emission in an optically pumped superlattice", Physical Review, B79 : pp. 245313-1 to 9.

Kohei Hotta, Shin-ichi Sakamoto, Daichi Tsukamoto, Yoshiaki Watanabe, 2009, "A prototype of small-size and self-oscillate thermoacoustic system", International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 2069-2072.

J. J. M. Slot, 2009, "Mathematical Aspects of Thermoacoustics", P. H. M. W. in't panhuis.

Limin Qiu, Bo Wang, Daming Sun, Yu Liu, Ted Steiner, 2009, "A thermoacoustic engine capable of utilizing multi-temperature heat sources", Energy Conversion and Management, 50, pp. 3187-3192.

감사의 글

석사과정의 2년이란 시간을 돌이켜 봤을 때 대학원 진학 때 목표해왔던 학문적 성과를 이뤄냈던 기억보다 저의 실수들이 더 많이 생각나는 이유는 제가 부족하기 때문이란 생각을 하며 아쉽기까지 합니다. 하지만 지금까지의 실수, 실패를 극복해왔던 기억들은 제가 앞으로 살아가는데 밑거름이 될 것이며 앞으로 생길 문제에도 저를 포기하지 않게 하는 큰 힘이 될 것이라 믿습니다. 논문을 마치며, 부족한 저를 믿음과 사랑으로 이끌어주신 분들께 감사의 말씀을 드리고자 합니다.

우선, 학문적인 길을 열어주셨을 뿐만 아니라 앞으로의 사회생활에 필요한 예의나 마음가짐 등에 대해 일깨워주셨던 지도교수이신 천원기 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 미흡한 저를 자신의 지도학생처럼 칭찬과 꾸지람으로 걱정해주시며 논문을 지도해주신 이운준 교수님, 김남진 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 이현주 교수님, 박재우 교수님, 김 신 교수님, 정범진 교수님께도 학부시절부터 지금까지 그간의 많은 가르침과 조언에 감사드립니다.

실험과 공부뿐만 아니라 못난 후배가 힘들 때면 용기를 북돋아 주신 준호형, 지훈이형, 승진이형에게 정말 감사하다는 말씀드리고 싶습니다. 그리고 2년이란 석사과정 동안 도움을 주신 보완이형, 상범이형, 민석이형, 실험 자재들을 구하지 못하고 있을 때 친동생처럼 신경써주신 고연중 선배님, 진호형, 성원이형께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 사랑하는 에너지공학과 조교선생님 형훈이형, 우용이, 힘들 때마다 같이 잘해보자고 다독겨려주었던 친구 영민이에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 또한 대학원과정을 함께했던 성식이, 재경이, 경욱이, 정환이, 세민이, 밤늦게까지 실험하는 선배 도와준다고 집에도 못가고 함께 고생해준 실험실 동생 상웅이, 희창이, 한배, 혜지, 성신이, 이번에 새로이 대학원을 진학한 진호, 플라즈마 실험실 동생들 인제, 종근이에게도 좋은 추억 만들어줘서 정말 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

끝으로 세상에서 가장 사랑하는 어머니, 큰누나, 작은누나, 돌아가신 아버지께 용기를 가지고 열심히 살아가는 것이 지금까지 받아온 은혜에 보답하는 길이라 생각하며 진실한 마음으로 성실하게 살겠다고 말씀드리고 싶습니다. 여기에 나열 못했지만 제가 아는 모든 분들께 감사드리며 건강과 성공을 기원합니다.