한국화재소방학회 논문지, 제23권 제4호, 2009년
[논 문]

J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 23, No. 4, 2009

리기다 소나무, 밤나무, 느티나무의 연소성질 비교

Comparison of Combustion Properties of the *Pinus rigida*, *Castanea sativa*, and *Zelkova serrata*

정영진†

Yeong-Jin Chung†

강원대학교 소방방재학부 소방방재공학전공
(2009. 5. 12. 접수/2009. 8. 7. 채택)

요 약

본 연구는 콘칼로리미터를 사용하여 한국 리기다 소나무, 밤나무, 느티나무의 연소성질을 조사하였다. 이들 종에 대한 열방출율과 연기 발생량을 측정하였다. 숯생성으로 인한 연소성 억제 증대에 대하여, 느티나무는 리기다 소나무, 밤나무에 비하여 좋은 성질을 보였다. 밤나무는 리기다 소나무, 느티나무에 비하여 높은 CO수율과 높은 CO/CO_2 수율을 나타내었다.

ABSTRACT

This paper investigated the combustion properties of the *Pinus rigida*, *Castanea sativa*, and *Zelkova serrata* which are grown in Korea using the cone calorimeter. The heat release rate and smoke production for these species were measured. With respect to an increase of retardant properties attributed to char formation, *Zelkova serrata* showed good properties compared with that of *Pinus rigida* and *Castanea sativa*. The *Castanea sativa* has high CO_{peak} Yield and high CO/CO_2 Yield compared with that of *Pinus rigida* and *Zelkova serrata*.

Key words : *Zelkova serrata*, Heat release rate, Combustion properties, Smoke production

1. 서 론

나무는 친환경적, 물리적 그리고 기계적 성질의 관점에서 좋은 성질을 가지고 있다. 그러나 건자재로서 나무의 결점은 그의 가연성이다. 건조한 나무의 기본 조성은 탄소 50%, 수소 6%, 산소 44%로 구성되고 그 외에 적은 양의 질소와 약간의 무기 화합물로 구성되어 있다.[1] 나무의 주요 성분은 셀룰로오스: 활엽수(40~44%), 침엽수(40~44%), 헤미셀룰로오스: 활엽수(23~40%), 침엽수(20~32%), 리그닌: 활엽수(15~25%), 침엽수(25~35%) 등의 비율로 이루어진다.[2]

나무의 주요 성분은 아주 다른 열분해 특성이 있으며, 이것은 구성물질들이 다른 온도 범위에 따라 휘발성 물질들을 방출하며 분해한다.[3] 셀룰로오스 240~350°C, 헤미셀룰로오스 200-260°C, 리그닌 280-500°C. 나무의 열분해 특성은 리그닌 성분이 증가됨에 따라 더 높은 온도로 변한다. 그의 방향족 화학구조는 900°C에서 35~38%에 달하는 높은 숯을 만들어 낼수 있다.[4]

숯은 산소가 쉽게 연소영역에 접근하는 것을 허용하지 않기 때문에 폴리머 물질의 연소속도를 감소시킨다.[5] 나무의 종은 일반적으로 활엽수와 침엽수로 구분되어진다. 침엽수는 활엽수보다 높은 리그닌 함량과 낮은 헤미셀룰로오스를 가지고 있다.[2] 연소에 있어서 이들의 차이는 나무 사이에서 연소열을 변화시키는 원인이 된다. 나무의 최대 연소열은 숯(char)생성과 수분함량 때문에 다소 낮아질 수 있을지라도 전형적으로 약 17MJ/kg으로 된다.[6]

나무는 연소될 때 타르와 검뎅이의 침착에 의하여 동반된 연기를 방출한다.[7,8] 나무의 불완전 연소가 일어난다면 대부분의 경우에 일산화탄소, 아산화질소, 황산화물, 거대고리 방향족 탄화수소 그리고 입자들이 방출된다.[9-11]

† E-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

나무의 열분해 및 연소의 거동에 대하여 Smith[12]와 Bilbao[13]에 의하면 착화는 중간 열속에서 백열로부터 불꽃연소로 진행하며, 증대된 열속에 의해 직접 불꽃연소로 발생된다. 이 연구는 발연 착화에 대하여 최소 열속에 대한 정보를 제공한다.

Boonmee와 Qiuntiere[14,15]는 콘칼로리미터를 이용하여 나무결 방향 또는 그의 수직방향으로 하여 방사 열속(heat flux)에 노출될 때 수직방향으로 나무의 백열 및 염열착화를 연구했다. 이론적인 착화 모델은 표면의 숯연소를 포함한 나무의 열분해에 대하여 개발되어졌다.

본 연구의 목적은 한국에서 자란 리기다 소나무, 밤나무, 느티나무의 열방출율 및 연기발생량을 비교하고, 구조 재료로의 사용에 대한 연소성을 평가 하고자 하였다.

2. 실 험

이 실험에서 사용된 시험목은 한국에서 자란 나무종으로서 지역 농부로부터 직접 얻었다. 특별히 시골지역에서 숲으로부터 지역적으로 쉽게 얻을 수 있는 나무 종은 난방을 위하여 사용되고 있다. 그리고 선택된 종은 전형적인 수종이다. ISO 3130[16]에 의하여 측정된 수분함량을 포함하는 시험에서 사용된 나무 종을 Table 1에 나타내었다. 나무를 베어서 각 나무를 연소하는 기간은 약 2년이 경과되었다. 시편의 체적 밀도는 그의 무게와 시험하기 전의 부피로부터 계산되어졌다.

콘칼로리미터[17]는 다음 주 성질을 결정하는데 사용되어졌다: 열방출율(heat release rate, HRR), CO와 CO_2 발생량과 연기차폐와 같은 화재연기지수,[11,18] 나무시편은 100mm × 100mm × 10mm의 규격으로 콘칼로리미터 시험전에 50% R.H.와 23°C에서 조절되어졌다. 시험편은 고밀도 세라믹 섬유보드 위의 저밀도 섬유 덮개에 놓여졌다. 모서리 프레임은 모서리 프레임 효과를 최소화하기 위해 사용되어졌다. 재료는 외부열원 50kW/m^2 에서 수평방향으로 시험되어졌다. 시험은 ISO 5660-1 표준으로 1분당 평균질량손실율이 150g/m^2 미만으로 떨어질 때 종료되어졌다. 모든 연소시험은 그 들의 재현성을 보증하기 위하여 3번씩 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 열방출율

물질의 성질은 그 것이 연소할 때 열이 물질로부터 방출되어지는 속도, 연기생성, 가스 독성을 결정한다. 시험하는 동안에 결정되는 주 연소특성은 열방출율이다. 그 것은 연소모델링을 위하여 중요한 측정이다.[19-22] 물질에 관련된 연소의 이해를 돕는 다른 중요한 성질은 착화시간(time to ignition, TTI)과 질량손실율(mass loss rate, MLR)이다.

외부 열원 50kW/m^2에서 시험된 3종의 HRR커브는 느티나무가 소나무와 밤나무의 그것과 비교하여 매우 빈약한 거동을 나타내었다. 느티나무의 HRR_{peak}은 소나무(287.7kW/m^2), 밤나무(370.5kW/m^2)에 비교하여 193.7kW/m^2였다(Table 2). 소나무와 밤나무는 HRR_{peak}에 도달된 시간이 각각 270s, 290s였으며 이와는 반대로 느티나무는 515s였다. 특히 소나무의 연소시에는 다른 수종에 비하여 일반적으로 잘알려진 테르핀류의 휘발성 물질을 많이 함유하는 것에 대하여 더욱 지배적인 연소반응이 이루어지는 것으로 판단된다. Figure 2

Table 1. Properties of the Tested Wood Species Grown in Korea

Samples	Class	Height (m)	Diameter (m)	Density (kg/m^3)	Moisture content (%)
Pinus Rigida	Softwood	12.5	15	419	10
Castanea Sativa	Hardwood	10.5	13	654	11
Zelkova Serrata	Hardwood	12.0	13.5	619	10

Table 2. Combustion Properties of the Wood Species

Samples	[a]TTI (s)	[b]MLR_{mean} (g/s)	[c]HRR_{peak} (kW/m^2)	[d]TSR_{whole} (m^2/m^2)	[e]SEA_{peak} (m^2/kg)	CO_{peak} (kg/kg)	CO_{2peak} (kg/kg)	CO/CO_2
Pinus Rigida	17	0.109	287.7	200.4	189.05	0.3229	25.44	0.000012
Castanea Sativa	37	0.112	370.5	213.6	78.63	0.5922	8.68	0.068202
Zelkova Serrata	41	0.085	193.7	82.5	113.66	0.5055	11.97	0.042230

[a]Time to ignition; [b]Mass loss rate; [c]Heat release rate; [d]Total smoke release; [e]Specific extinction area

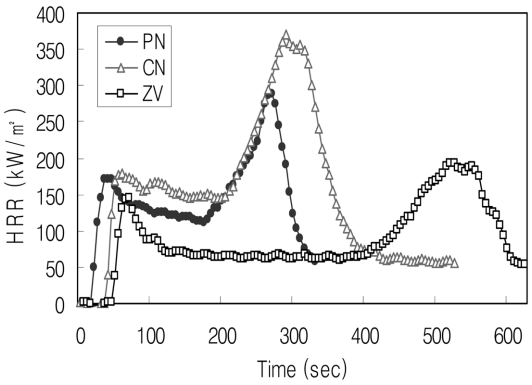

Figure 1. HRR curves of the wood species at 50kW/m^2 external heat flux. PN: *Pinus rigida*, CN: *Castanea sativa*, ZV: *Zelkova serrata*.

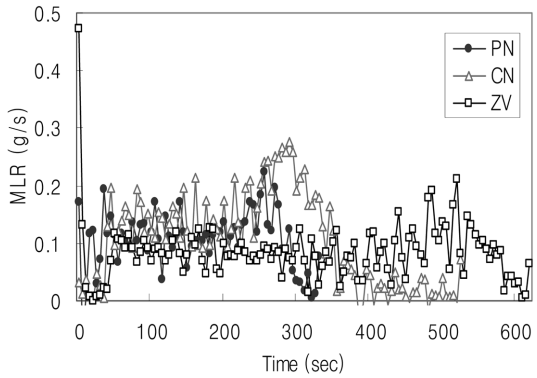

Figure 3. MLR curves of the wood species at 50kW/m^2 external heat flux.

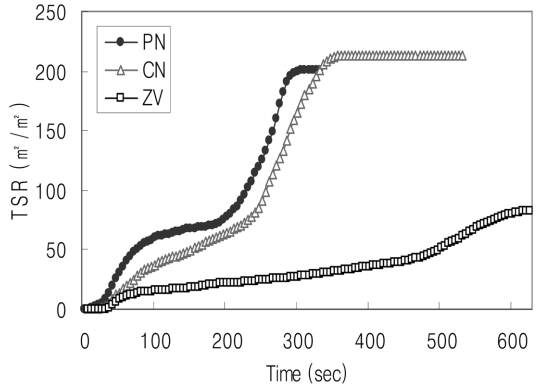

Figure 4. TSR curves of the wood species at 50kW/m^2 external heat flux.

에서 보여준 바와 같이 느티나무는 특별히 강한 연소 지연성을 가지는 것으로 보여준다.

HRR커브는 느티나무의 연소가 소나무와 밤나무에 비하여 늦어지는 것을 보여준다. 연소의 끝에서 측정된 소나무, 밤나무, 느티나무에 대하여 Table 2에 주어진 HRR값은 각각 다르다. 그 차이는 느티나무의 연소에서 오랜시간 동안 발생하는 후백열 현상 때문일 수 있다.

그럼에도 불구하고 연소의 끝에서 3가지 물질의 잔여물들이 완전히 다르다는 것을 아는 것은 중요하다. 느티나무와 밤나무의 잔여물은 소나무의 잔여물과 비교하여 오직 검은색으로 나타났다. 소나무종은 부드러운 흰색의 재였다.

연소의 착화시간(TTI)은 각 종에 대하여 Table 2에 나타내었다. TTI는 느티나무가 41s로 소나무(17s), 밤나무(37s)에 비하여 늦어진다. Figure 2에서 나타낸 바와 같이 밤나무, 느티나무는 숯생성을 나타내었다. 특별히 느티나무는 숯의 단열효과로 강한 연소 지연성을 나타내는 것으로 판단된다.

(a) *Pinus rigida* (b) *Castanea sativa* (c) *Zelkova serrata*

Figure 2. The residues of the wood species after combustion.

Figure 4에서 질량손실율(MLR)은 화재거동에 대하여 추가적인 정보를 준다. 50kW/m^2 에서 느티나무의 평균 MLR은 소나무(0.109g/s), 밤나무(0.112g/s)에 비하여 0.085g/s였다. 느티나무는 연소하는 동안 질량손실율을 억제하는데에 공헌하였다. 이에 반하여 소나무와 밤나무는 비교적 높았다(Table 2와 Figure 3) 왜냐하면 느티나무는 많은 숯생성을 통하여 추가적인 연소를 억제하기 때문으로 판단된다.

3.2 연기와 탄소 산화물 방출

물질에 관련된 연소의 이해를 돕는 또 다른 중요한 파라미터는 연기와 독성가스의 방출이다. 나무연소 중 가스 생성물의 독성 일부는 CO_2를 동반하는 CO의 방출에 의하여 결정되어진다. 그 결과는 Table 2에 주어진다.

밤나무의 총연기방출율(total smoke release, TSR_{whole})은 소나무(200.4m^2/m^2)나 느티나무(82.5m^2/m^2)의 것 보다 높은 213m^2/m^{2}였다. 느티나무는 연소하는 동안 현저하게 연기억제에 기여하였다. 이에 반하여 소나무와 밤나무의 연소 시 연기 발생량은 비교적 많다. 또한 연기 차폐는 비소화면적(specific extinction area, SEA_{peak})으로 설명되어진다. 밤나무의 비소화면적은 소나무나 느티나무의 그것보다 낮다(Figure 5). 밤나무와 느티나무는 각각 78.63m^2/kg, 113.66m^2/kg의 연기를 방출했다. 그러나 소나무의 SEApeak(189.05m^2/kg) 는 밤나무와 느티나무의 값보다 더 높았다. 그 것은 소나무가 연소의 초기 단계에서 쉽게 연소되기 때문이다.

CO와 CO_2의 수율은 물질 연소에 의존한다.[23] Figure 6은 콘칼로리미터에서 방출된 시간에 따른 CO 발생량을 나타낸다. 밤나무와 느티나무의 CO 발생율은 소나무의 그것보다 점차적으로 증가되어 진다. 소나무에 대한 CO의 발생율은 시간에 따라 감소되어진다. Table 2에서 밤나무 및 느티나무로부터 CO_{mean}의 발생량은 소나무의 값 보다 비교적 높다(소나무: 0.3229kg/kg at 320s, 밤나무: 0.5922kg/kg at 505s, 느티나무: 0.5055kg/kg at 610s). 이것은 Figure 6과 유사한 경향성을 나타내며, 앞의 3.1절에서 설명된 바와 맥을 같이 한다. 즉 숯의 생성으로 인하여 연소표면에 산소를 차단시킴으로써 불완전 연소를 하기 때문으로 판단된다.

Figure 7은 콘칼로리미터에서 방출된 시간에 따른 CO_{2peak} 발생량을 나타내었다. 시간이 지남에 따라 소나무는 짧은 시간의 경과임에도 불구하고 CO_2 발생이 멈춰졌고, 밤나무는 CO_{2peak} 발생율이 300s 근처에서 가장 컸으며, 느티나무는 가장 긴 시간 동안 CO_2를 방출하였다. 이것은 소나무가 테르핀류의 많은 휘발성 물질을 함유하고 있고,[24-26] 그의 체적밀도가 낮으므로 인

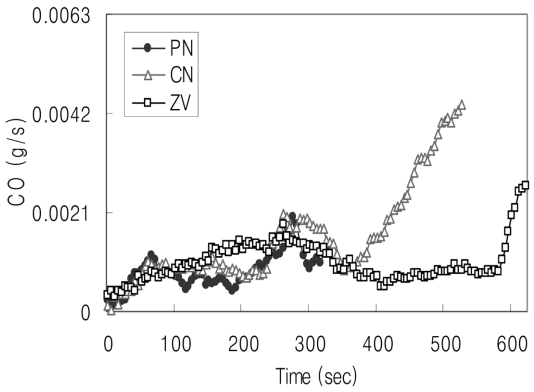

Figure 6. CO production rate curves of the wood species at 50kW/m^2 external heat flux.

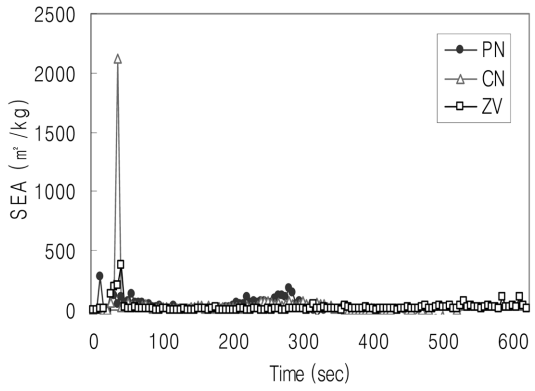

Figure 5. SEA curves of the wood species at 50kW/m^2 external heat flux.

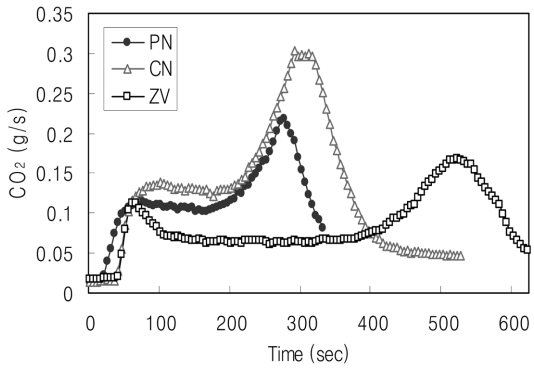

Figure 7. CO_2 production rate curves of the wood species at 50kW/m^2 external heat flux.

하여 연소속도가 커졌음을 의미한다. 밤나무 및 느티나무는 연소 중 생성된 숯의 단열효과로 인하여 연소지연 효과를 나타내는 것으로 이해된다. Table 2에서 보는 바와 같이 소나무는 320s에서 25.44kg/kg로 밤나무(8.68kg/kg at 355s)와 느티나무(11.97kg/kg at 610s)의 그것에 비교하여 비교적 높은 수율의 CO_2를 방출했다. CO_2의 높은 수율은 더욱 완전한 연소가 일어나고 있는 것을 나타내고, CO/CO_2 비가 낮은 것은 노출독성이 낮다는 것을 나타낸다. 이 것은 CO 방출에 관한 설명과 반대가 된다. 즉 완전연소는 연소표면에 산소차단 효과가 적은 것으로 이루어진다.

4. 결 론

한국에서 자란 리기다 소나무, 밤나무, 느티나무의 열방출율과 연기 발생량을 측정하였다.

1) 느티나무는 낮은 HRR_{peak}(193.7kW/m^2)을 나타내었고, 리기다 소나무, 밤나무에 비하여 낮은 MLR_{mean}(0.085g/s) 을 나타내었다. 게다가 느티나무는 다른 시험된 종에 비하여 오랜 시간 동안 의 TTI가 소요되었다(41s). 이 결과는 느티나무가 다른 종에 비하여 많은 양의 숯을 생성하여 연소억제에 기여하는 것으로 판단된다.

2) 밤나무는 리기다 소나무와 느티나무에 비하여 높은 CO_{peak} 수율(0.592kg/kg)과 높은 CO/CO_2 수(0.068202)을 방출하였다. 또한 밤나무는 높은 TSR_{whole}(213.6m^2/m^2)을 나타내었다. 그 것은 연소공정 동안에 불완전 연소를 하기 때문으로 판단된다.

3) 밤나무는 비교적 높은 CO_{peak} 수율(0.5922kg/kg) 때문에 구조 재료를 위하여 시험된 것들 중 연소시 가장 위험한 나무 종으로 판단된다.

4) 느티나무는 화재손실의 가능성을 최소화 하기 때문에 구조 재료로 사용되는데에 추천되어 질 수 있다.

참고문헌

1. W.S. Atkins, “Wood Utilisation Systems-Combustion Strateges”, Energy Technolodge Support Unit, Department of Energy. U.K.(1984).
2. V. Babrauskas, “Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. Interflam 2001”, pp.71-88, Interscience Communications Ltd., London(2001).
3. D. Drysdale, “An Introduction to Fire Dynamics”, John Wily & Sons(1996).
4. A.D. Chirico, M. Armanini, P. Chini, G. Cioccolo, F. Provasoli and G. Audiso, “Flame Retardants for Polypropylene Based on Lignin”, Polymer Degradation and Stability, Vol.79, pp.139-145(2002).
5. F.M. Pearce, Y.P. Khanna and D. Raucher, “Thermal Analysis in Polymer Flammability”, In: Thermal Characterization of Polymeric Materials, Chap. 8, Academic Press, New York(1981).
6. A.H. Buchnan, “Structural Design for Fire Safety”, pp.35-37, John Wiey & Sons, LTD(2001).
7. J.B. Carle and J.L. Brown, “Wood as a Source of Solid Fuel: A Review”, ed. G.S. Watt, New Zealand Forest Service, Auckland(1976).
8. H. Kubler, “Wood as Building and Hobby Material”, pp.139-149J, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A. (1980).
9. J. Tissari, K. Hytonen, J. Lyynranen and J. Jokinienmi, “A Nodel Field Measurement Method for Determining Fire Particle and Gas Emissions from Residential Wood Combustion”, Atmospheric Environment, Vol.41, No.37, pp.8330-8344(2007).
10. M. Glasius, M. Ketzel, P. Wahlin, B. Jensen, J. Monster, R. Berkowicz and F. Palmgren, “Impact of Wood Combustion on Particle Levels in a Residential Area in Denmark”, Atmospheric Environment, Vol.40, No.37, pp.7115-7124(2006). doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.047.
11. Y.J. Chung, “Flame Retardancy of Veneers Treated by Ammonium Salts”, Journal of the Korean Industrial & Engineering Chemistry, Vol.18, No.3, pp.251-254(2007).
12. W.K. Smith and J.B. King, “Surface Temperratures of Materials During Radiant Heating to Ignition”, J. Fire Flammability, p.1(1970).
13. R. Bilbao, “Experimental and Theretical Study of the Ignition and Smoldering of Wood Including Convective Effects”, Combust Flame, pp.126(2001).
14. N. Boonmee and J.G. Quintiere, “Glowing the Ignition and Burning Rate of Wood”, In: Twenty-ninth Symposium (international) on combustion, pp.289-296, The Combustion Institute(2002).
15. N. Boonmee and J.G. Quintiere, “Glowing Ignition of Wood: The Onset of Surface Combustion”, In: Thirtieth Symposium (international) on combustion, The Combustion Institute(2004).
16. ISO 3130, “Wood-Determination of Moisture Content for Physical and Mechanical Tests”(1975).
17. ISO 5660-1, “Reaction-to-Fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)” (2002).
18. EN 13823, “Reaction to Fire Tests for Building Products. Building Products Excluding Floorings

Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item"(2002).
19. V. Babrauskas, "Development of Cone Calorimeter-A Bench-scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption", Fire and Materials, Vol.8, No.2, pp.81-95(1984). doi: 10.1002/fam.810080206.
20. V. Babrauskas and S.J. Grayson, "Heat release in Fires", P.644, E & FN Spon(Chapman and Hall), London, UK(1992).
21. 박형주, 김홍, "일정한 복사열원에 노출된 목재의 탄화속도에 관한 연구", 한국화재소방학회논문지, Vol.18, No.4, pp.86-92(2004).
22. G. Ondrej, H. Elena and O. Anton, "Cone Calorimeter Studies of Wood Species", International Symposium on Fire Science and Technology, pp.77-84, 한국화재소방학회: 학술대회논문집(1997).
23. R.T. Hull and T. Paul Keith, "Bench-scale Assessment of Combustion Toxicity-a Critical Analysis of Current Protocols", Fire Safety Journal, Vol.42, No.5, pp.340-365(2007). doi: 10.1016/j.firesaf.2006.12.006.
24. M. Staudt, N. Bertin, U. Hansen, G. Seufert, P. Cieeioli, P. Foster, B. Frenzel, J.-L. Fugit and L. Torres, "The BEMA-project: Seasonal and Diurnal Patterns of Monoterpene Emissions from Pinus Pinea (L.)", Atrmospheric Environment, Vol.31, pp.145-156(1997).
25. Y. Yokochi and Y. Ambe, "Factors Affecting the Emission of Monoterpenes from Red Pine (Pinus densiflora), Plant Physicol, Vol.75, pp.1,009-1,012.
26. J.-C. Kim, J.-H. Hong, C.-H. Gang, Y. Sunwoo, K.-J. Kim and J.-H. Lim, "Comparison of Monoterpene Emission Rate from Conifers", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol.20, No.2, pp.175-183.