

병목현상 시 유동률에 대한 피난실험 및 모델링 비교

황은경 · 우수진*[†] · 김종훈** · 김운형***

한국건설기술연구원, 연구위원, *한국건설기술연구원, 전임연구원, **(주) H2K솔루션,
***경민대학교 소방행정과 부교수

Comparison of Egress Modeling and Experiments for Flow Rate in the Bottleneck

Eun-Kyoung Hwang · Sujin Woo*[†] · Jong-Hoon Kim** · Woon-Hyung Kim***

Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**H2K Solution Inc.

***Professor, Dept. of Fire Safety Administration, Kyungmin College.

(Received October 31, 2014; Revised December 18, 2014; Accepted December 18, 2014)

요 약

병목현상은 많은 피난인들이 출구나 복도를 지나가려하게 되면 생기는 현상이다. 병목현상으로 인해 시간의 지연이 생기게 되며, 이는 건물 화재 시의 피난 예측에서 매우 중요한 요소가 된다. 피난시간 분석에서 병목현상은 유동률이라는 요소로 반영된다. 이는 시간당 단위 폭 당 통과되는 사람의 수를 나타낸다. 피난모델링에서 계산되는 유동률은 피난실험의 결과에 근접해야하며, 이에 대한 확인은 필수적인 사항이다. 본 연구에서는 유동률에 대한 피난실험의 결과와 피난모델 Pathfinder의 적용결과를 비교하여 보았다. 그 결과 피난실험과 모델링의 결과 값은 차이를 보여주고 있다. 실험의 평균값은 4.25 N/m · s이고 시뮬레이션의 최대 값은 1.55 N/m · s로 나타났다.

ABSTRACT

Bottleneck occurs as many people crowd into narrow doorway or corridor. Delaying egress time is occurred by bottleneck effect, and it is very important phenomenon on the egress analysis for building fire. An analysis of egress time should includes flow rate for considering bottleneck. Flow rate is numbers of people who pass the narrow gate as door or start point of corridor per unit length and unit time. The flow rate resulted from egress modeling should be approached to the result of experiments. In this study, flow rates from modeling by 'Pathfinder' and experiments was compared. The difference between the result from egress modeling and the one from experiments was verified. The average value of experiments is 4.25 N/m · s, and the maximum average value of modeling is 1.55 N/m · s.

Keywords : Flow rate, Egress experiment, Egress modeling, Comparison, Validation

1. 서 론

병목현상은 많은 피난인들이 출구나 복도를 지나가려하게 되면 생기는 현상이다. 병목현상으로 인해 시간의 지연이 생기게 되며, 이는 건물 화재 시의 피난 예측에서 매우 중요한 요소가 된다. 피난시간 분석에서 병목현상은 유동률이라는 요소로 반영된다. 이는 시간당 단위 폭 당 통과되는 사람의 수를 나타낸다. 피난모델링에서 계산되는 유동률은 피난실험의 결과에 근접해야하며, 이에 대한 확인은 필수적인 사항이다.

이러한 확인과정은 프로그램 제작사에 의해 제시되는데, Pathfinder의 V&V보고서에는 Seyfried 등에 의한 병목현상 실험결과와 Pathfinder 적용의 결과를 비교하는 내용이 나온다⁽¹⁾. 이 실험은 Seyfried, Passon에 의해 2007년도에 수행되었으며, 병목현상과 피난문의 용량 측정을 위해 수행되었다. 이 실험은 복도가 있는 방을 만들어 수행되었다. 20, 40, 60명의 인원이 참가했으며, 15가지 케이스로 진행되었다. 문의 폭은 0.8 m~1.2 m이었다. 보행속도는 0.93 m/s~1.85 m/s의 균등분포(uniform distribution)로 설정하였다. 이 분포는 IMO 1238에서 30대 이하 남성과

[†]Corresponding Author, E-Mail: ekhwang@kict.re.kr
TEL: +82-31-910-0355, FAX: +82-31-910-0361

Table 1. Physical Characteristics of People

Division	Men (81 persons)			Women (19 persons)		
	Walk (m/s)	Run (m/s)	Body width (cm)	Walk (m/s)	Run (m/s)	Body width (cm)
Average	1.59	4.60	47.06	1.56	3.49	41.47
Min.	2.74	5.95	40.00	1.92	4.55	35.00
Max.	1.22	3.29	53.00	1.35	2.43	51.00
Std. Dev	1.54	0.65	3.16	1.19	1.07	3.53

여성의 보행속도 범위를 설정하였다. 결과에서는 실험과 시뮬레이션 결과의 차이를 보이고 있다. 60명의 이동에서 폭이 1 m인 경우 실험은 34초가 소요되었으나, Steering Mode에서 58.6초를 보여주고 있다. 즉 실험의 유동률은 1.76 N/m·s이지만, 모델의 적용결과는 1.02 N/m·s로 낮아짐을 보여주고 있다. 국내에서도 실시된 문에 대한 통과 시 유동률 측정 실험의 결과를 보면 3.43~4.93 N/m·s를 보여주고 있다.

국내에서 성능위주설계에 피난모델을 사용하기 위해서는 이러한 문제들에 대해 실험과의 비교를 통해 확인해볼 필요성이 있다. 본 연구에서는 한국인을 대상으로 기초데이터를 측정하고 병목현상 실험을 수행한 후, 이를 모델 Pathfinder에서 가능한 방법으로 입력하여 그 결과를 비교 분석해보았다.

2. 피난모델 Pathfinder 이동현상 구현방식

Pathfinder는 미국 Thunderhead Engineering 사에 의해 개발되었으며, 에이전트(Agent)를 기반으로 하여 피난과 인간행동을 시뮬레이션하는 모델 프로그램이다. 기존 상용 모델들에 비해 강화된 3D 공간의 가시화 능력과 다양한 이동현상 구현방법 등의 장점을 가지고 있다. 특히 CAD 파일을 기반으로 하여 3D 가시화를 시킬 수 있는 능력이거나 각 요소 배치 및 설정의 용이성이 뛰어나 사용자환경에 많은 노력을 기울인 프로그램이다. 이 모델은 에이전트 기반 모델(agent based model)이라고 할 만큼 각 에이전트별 행동예측을 기반으로 전체적인 피난현상을 예측하는 미시적 모델(microscopic model)로서 매우 뛰어나다고 할 수 있다. 이 모델의 이론적 장점은 3가지 이동현상 구현방식을 가지고 있다는 점이다. 이는 하나의 공간과 설정에 대하여 3가지 다른 방식의 접근을 통한 분석이 가능하다는 것을 의미한다.

이 모델의 가장 특징적인 부분은 바로 Steering Mode의 채용이다. Steering Mode는 피난자인 에이전트가 의도된 경로를 따라 진행하는 도중 변화된 환경에 반응하는 것을 허용한다. 각 에이전트는 자신의 위치와 목표지점을 연결하는 선택된 경로를 유지한다. 하지만 이동도중 타인과의 충돌 등과 같은 요소는 잠시 선택하여 진행하고 있는 경로를 벗어나게도 만들지만, 다시 그 선택된 경로를

따라가기 위해 움직임을 만들어낸다. 에이전트의 중심에서 진행방향으로 5개의 벡터를 이용하여 방향을 설정하며, 탐색행위, 벽 회피행위, 타 에이전트 회피행위 등의 3가지 행태를 사용하여 이들 벡터의 합에 의해 진행방향을 결정하도록 되어있다. 충돌과 회피에 대한 반응에서 벽과의 충돌만 고려하거나 벽-에이전트 모두의 충돌을 고려하는 선택이 있다. 병목과 같은 타 에이전트와의 경쟁에서는 자유통과권의 부여로 해결하며, 목표지점 또는 목표교차점에 대해 가까운 거리에 있는 에이전트는 속도 0에서 타 에이전트의 영향을 무시하고 이동하는 방법을 취하고 있다^(2,3).

3. 인적 데이터 입력을 위한 분석

실험에 참여한 남녀 지원자들은 총 100명으로 각 인원의 특성을 측정하고 이를 모델에 입력하기 위한 데이터를 분석하였다. 남자는 총 81명, 여자는 19명이었으며, 각 인원별로 몸의 폭, 길이, 무게 등의 데이터가 측정되었으며, 이 측정결과는 각 인원별 데이터, 평균, 최대-최소, 그리고 표준편차 등을 다음 표와 같이 정리하여, 활용하였다.

4. 병목현상 시 유동률 측정 실험

4.1 병목현상 유동률 측정 실험 개요

확인과정에 대해서 IMO 1238 문서의 ANNEX 3에 검증과 확인(verification & validation)에 대한 지침을 제공하고 있다. 이 문서에서 Test 8의 counterflow 현상의 검토를 위해 두 개의 방과 복도를 연결하는 세트를 제시하고 있다. 이 세트는 사용되는 두 개의 방을 복도로 연결하고

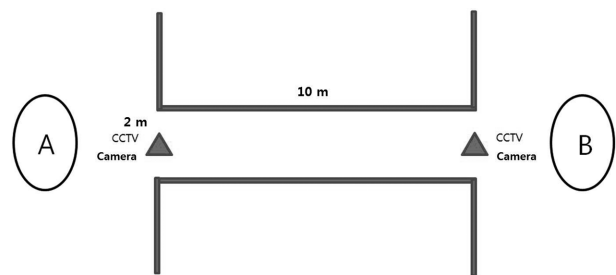


Figure 1. Sketch of experimental setup.



Figure 2. A Scene of experiment.

여기서 발생하는 이동현상에 검증 부분이 있다. 이 세트는 두 개의 방 사이에 2 m 폭, 10 m 길이의 복도로 연결되어 있다. 본 실험에서는 이와 동일하게 두 개의 방과 같은 구획 사이에 폭 2 m, 길이 10 m의 복도가 연결이 되도록 제작하였다. 제작 공간의 천장이 높지 않은 관계로 전체 사진을 찍지는 못하였지만 복도 끝부분의 유출입 장소에는 직상부에 CCTV카메라를 설치하여 측정하였다.

4.2 실험의 수행

병목현상 실험 세트의 그림과 같이 A지점에 100명의 실험 인원을 배치하여, B지점으로 이동하며 발생하는 정체 현상 시작 시간과 종료 시간을 영상을 통해 판정하고, 그 기간 동안 통과한 인원과 지속 시간을 산정하여 유동률을 구해보았다.

4.3 실험의 결과

건기가 아닌 최대한 신속하게 이동하는 상황에서 발생한 병목현상에 대해 측정을 수행하였다. 그 결과 영상판독을 통해 측정된 유동률은 3.91~4.6 N/m·s인 것으로 나타났다. 이전 국내에서 한국인을 대상으로 수행된 실험에서 나타났던 3.43~4.93 N/m·s와 유사한 범위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로서 출구 밖이 열린 공간이거나 복도인 것은 관계없이 흐름에 막힘만 없으면 대체로 유사한 결과가 나타난다는 것도 알 수 있다.

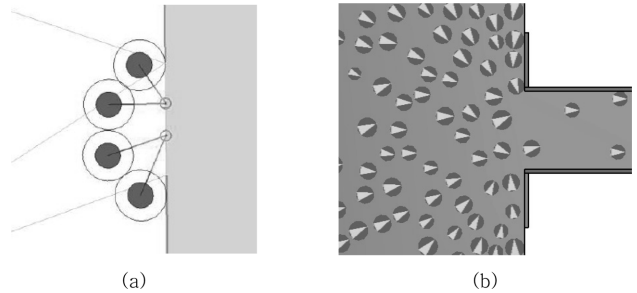


Fig. 3. Passing through the connection between spaces in pathfinder model.

5. 피난모델에 의한 분석

5.1 병목현상에 대한 시뮬레이션 수행

실제 실험에 대한 시뮬레이션의 적용분석은 매우 중요하다. 특히 피난현상의 분석에 있어서 핵심이라 할 수 있는 병목현상에 의한 정체 모사는 더욱 그러하다. 이러한 모사를 실제적으로 하기 위해서는 가능한 실험의 측정값을 정확히 넣는 것이 중요하다. 이를 위해 실험에서는 참가자들의 신체 크기와 이동속도를 모두 측정하였으며, 이러한 데이터를 시뮬레이션에 입력해보았다. Pathfinder는 크게 4가지의 입력방식을 지원한다고 할 수 있다.

첫 번째는 각 개인의 데이터를 모두 넣는 방법이고, 두 번째는 전체의 평균값을 입력하는 것이다. 세 번째는 최댓값과 최솟값을 주고 그 사이에 균등한 분포로 데이터를 적용하는 방법이다. 마지막은 정규분포로 해당 값을 입력하는 방안이다. 본 시뮬레이션의 분석에서는 4가지 방식에 대해 각각 3회씩 수행하고 그 값을 토대로 실험과 비교분석을 수행해보았다. 또한 정체가 생기는 구간을 경계면으로 설정하고, 출구를 두어 steering mode의 출구에서 경합에 대한 처리 알고리즘이 작동하지 않는, 각 인원의 이동을 통한 병목현상 형성을 적용하고 이를 영상분석과 동일한 방법으로 판정해보았다.

5.2 개별 인원특성 입력 분석결과

5.2.1 100인 개별 인원특성 입력분석

복도의 입구로부터 3 m 떨어진 곳을 기준으로 하여 시뮬레이션 인원을 배치하였다. 인원의 총원은 실제 실험과 똑같은 100명으로 설정하였다. 이동속도 및 어깨넓이도

Table 2. Result of Experiments

Division	1st			2nd		
	Time (s)	Pass (Persons)	Remain (Persons)	Time (s)	Pass (Persons)	Remain (Persons)
Start of congestion	2.6	16		3.2	21	
End of congestion	11.2		4	11.9		11
Continue of congestion	8.7	80		8.7	68	
Flow rate (N/m·s)	4.60			3.91		

Table 3. Modeling by Each Person's Data

	Pass (Number of people)	Time Interval (s)	Flow rate (N/m · s)
1st	92	30.4	1.51
2nd	92	30.8	1.49
3rd	90	31.4	1.43

Table 4. Modeling by Average Data

	Pass (Number of people)	Time Interval (s)	Flow rate (N/m · s)
1st	95	31.1	1.58
2nd	93	30.6	1.52
3rd	91	29.5	1.54

실제 실험 인원의 데이터를 입력해, 보다 실제 실험과 비슷한 상황을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 인원의 배치는 최대한 밀집하여 위치시켰다.

5.2.2 100인의 평균 인원특성 입력 분석

위의 시뮬레이션과 동일하게 100명의 인원을 복도의 입구로부터 3 m 떨어진 위치에 배치하였다. 시뮬레이션 상의 이동속도와 어깨넓이는 실제 피난 실험자의 이동속도와 어깨넓이를 평균값을 구해 입력하였다.

5.2.3 100인 최대/최소 균등분포 인원특성 입력분석

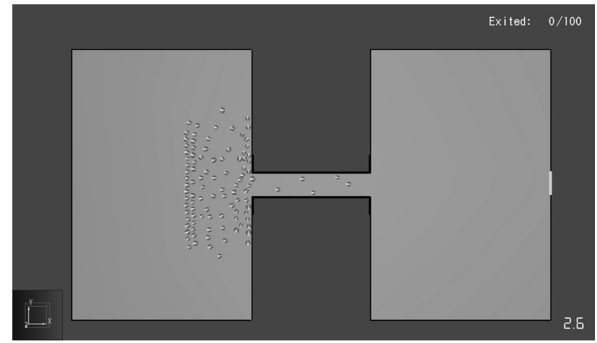
피난 시뮬레이션의 인원은 Profiles 100 Persons과 동일한 100명으로 설정하여, 복도의 입구로부터 3 m 떨어진 지점에 배치하였으며, 이동속도와 어깨넓이에 실제 실험 참가자들의 최소/최대 값을 입력하였다. 최소/최대 값은 실제 피난 실험 참가자들을 평균값과 마찬가지로 남녀로 구분하여 성별에 따른 최소/최대 값을 적용하였다.

Table 5. Modeling by Min/Max Data

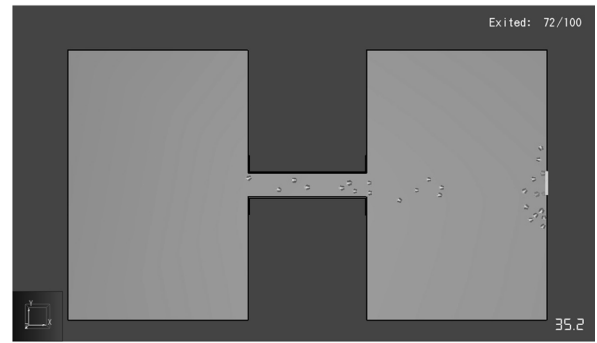
	Pass (Number of people)	Time Interval (s)	Flow rate (N/m · s)
1st	92	30.8	1.5
2nd	89	30.6	1.45
3rd	94	30.9	1.52

Table 6. Modeling by Std. Dev. Data

	Pass (Number of people)	Time Interval (s)	Flow rate (N/m · s)
1st	94	32.6	1.44
2nd	86	29.1	1.48
3rd	86	28.0	1.52



(a) Bottleneck Start



(b) Bottleneck End

Figure 4. Bottleneck in pathfinder modeling.

5.2.4 100인의 정규분포 인원특성 입력 분석

피난 시뮬레이션의 인원은 profiles 100 person과 동일한 100명으로 설정하여, 복도의 입구로부터 3 m 떨어진 지점에 배치하였으며, 이동속도와 어깨넓이에 실제 실험 참가자들의 최소/최대 값을 입력하였다. 최소/최대 값은 실제 피난 실험 참가자들을 평균값과 마찬가지로 남녀로 구분하여 성별에 따른 최소/최대 값을 적용하고, std. Dev의 값을 추가로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 7. Result of Simulation Modeling

Type	Flow rate (N/m · s)	Average flow rate (N/m · s)
Individual-data	1.51	1.47
	1.49	
	1.43	
Average-data	1.58	1.54
	1.52	
	1.54	
Max/Min uniform distribution	1.50	1.49
	1.45	
	1.52	
Normal distribution	1.44	1.48
	1.48	
	1.52	

5.3 시뮬레이션의 결과

인적특성 중 어깨 넓이와 이동속도에 대한 데이터의 4 가지 입력방식별로 각 3회씩 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과를 보면 평균데이터를 입력해서 수행한 부분이 가장 높은 데이터를 보여주고 있다. 그렇지만 나머지 부분은 모두 대체로 비슷한 결과를 보여주고 있다. 결과를 보면 대체로 1.43~1.58 N/m·s의 값을 보여주고 있다. 개별데이터 입력이 낮은 값을 평균데이터 입력이 높은 값을 결과로 나타내었음도 알 수 있다.

6. 실험과 모델링 결과 비교 분석

본 연구에서는 병목현상에 대한 실험과 시뮬레이션 적용분석을 수행하고 그 결과를 비교해보았다. 실제 실험은 2회 실시하였으며, 3.91 N/m·s, 4.6 N/m·s의 값을 보여주었다. 이에 비하여 시뮬레이션 수행 분석의 결과는 1.43~1.58 N/m·s의 값을 보여주고 있다. 이러한 값의 비교는 아래 Table 8과 같다.

Pathfinder에서 자연적 에이전트간의 경합에 의한 병목현상의 구현은 실제 현상보다 많은 차이를 나타내고 있다. 이는 데이터 입력의 변화에 의해 그 차이를 좁힐 수 있는 것은 아닌 것으로 판단된다.

병목에서의 모사는 피난의 분석에 있어 매우 중요하다. 대부분의 병목은 거실의 문의 통과 시로 가정할 수도 있지만, 지형이 좁아지거나 변화하는 구간으로서 특별히 문이 설치되지 않는 경우도 있다. 이전의 연구에서와 마찬가지로 특별히 문을 설정하지 않는 경우에 있어서는 인원의 통과에 있어서 실제와 큰 차이를 보여줄 수 있다. 이는 순수하게 Pathfinder의 agent model의 2D 평면상 구현의 문제가 있으며, steering model에서의 경합에 대한 처리도 생각해볼 수 있다. 좁은 지역의 통과에 있어서는 피난인의 밀집과 그에 의한 통과가 잘 모사되어야 하지만, 이는 원판(Disk)으로 2D 평면상에 모델화하는 부분에 의해 그 모사의 정밀도가 떨어지는 것으로 판단된다.

즉, 좁은 지역에서 몸을 움츠리고 타인과의 거리에 상관하지 않고, 신속하게 뛰어서 통과하는 경우에는 몸이 원형이 아닌 타원으로 정상상태로 서있을 때 보다 더 좁은 신체사이즈로 또 몸을 돌리기도 하는 등의 형태가 나타나게

Table 8. Result of Modeling

Data		Flow rate (N/m·s)			
		1st	2nd	3rd	Ave.
Experiment		4.60	3.91	-	4.25
Egress Model Pathfinder	Individual value	1.51	1.49	1.43	1.48
	Average value	1.58	1.52	1.54	1.55
	Uniform distribution	1.50	1.45	1.52	1.49
	Normal distribution	1.44	1.48	1.52	1.48

된다. 이에 대해 하나의 원판으로 피난인을 정의하는 경우 이러한 부분의 반영이 어려워 위와 같은 차이를 가져오게 되는 것으로 판단된다. 이에 대한 증명을 위해서는 신체사이즈의 변화, 그리고 진행방향에서 일정각도로 회전이 가능한 피난모델이 있어야 하지만, 이러한 모델은 현재 없다.

7. 결 론

본 연구에서는 병목현상에 대한 실험과 시뮬레이션 적용분석을 수행하고 그 결과를 비교해보았다. 실제 실험은 2회 실시하였으며, 3.91 N/m·s, 4.6 N/m·s의 값을 보여주었다. 이에 비하여 시뮬레이션 수행 분석의 결과는 1.43~1.58 N/m·s의 값을 보여주고 있으며, 많은 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 모델의 에이전트에 대한 특성값의 입력 데이터 변경으로서 좁혀질 수 있는 것은 아닌 것으로 판단된다. 이는 현재 사용하고 있는 에이전트의 2D 평면상 모사에 있어, 원판으로의 가정하는 것을 변경하여, 밀집도를 향상시키고, 몸의 회전을 가능하게 하여 더 신속하게 통과하도록 하는 기능을 개발하는 것에 대한 고려가 필요하다. 결과적으로 볼 때 이러한 상황의 반영이 가능하도록 모델자체에 있어서의 새로운 변화가 필요한 것으로 보인다. 또한, Pathfinder의 사용자는 병목현상이 발생할 것으로 예상되는 지점을 자연적인 연속적 공간으로 설정하는 것에 주의해야함을 알 수 있다.

차후 이러한 분석을 통해 여러 모델의 국내적응성에 대한 검증이 추가적으로 진행될 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원(KICT) “2014 리스크 분석 기반 피난연동 S/W 개발(건축)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. THUNDERHEAD ENGINEERING, Pathfinder Verification and Validation (2014).
2. THUNDERHEAD ENGINEERING, Pathfinder Technical Reference (2014).
3. THUNDERHEAD ENGINEERING, Pathfinder User Manual (2014).
4. J. H. Kim, B. J. Yoo, E. K. Hwang and H. J. Youn, “Comparison of Experiment and Egress Modeling for Bottleneck Effect”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 28, No. 11, pp. 93-100 (2012).
5. Jeffrey S. Tubbs, PE, Brian J. Meacham, PhD, PE, Egress Design Solutions, John Wiley & Sons, Inc. (2007).
6. J. H. Kim, E. K. Hwang and H. J. Youn, “Measurements of Flow-Rate with Korean for Performance Based Egress

- Safety Design”, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12 No. 2 (2012).
7. J. H. Choi and W. H. Hong, “A Development of Occupant’s Vertical Travel Time Prediction Model from High-rise Building’s Experimental Data”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 28, No. 11 pp. 375-382 (2012).
 8. S. Woo and E. K. Hwang, “Study on Improvement of Evacuation Experiment Design Factors through Analysis of Evacuation Experiments from Buildings in Korea”, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 3, pp. 219-225 (2014).
 9. I. Gwon, Architecture Disaster · management, Dong Hwa Technology Publishing Co. (2007).
 10. Y. Gwon and C. Kim, Architecture and Fire, Dong Hwa Technology Publishing Co. (2006).