

## 고온가열 콘크리트의 강도 특성과 현상

### Strength Characteristic and Phenomenon of Heated Concrete by High Temperature

태 순 호\* · 이 병 곤\*

Soon-Ho Tae · Byung-Kon Lee

(1997년 3월 14일 접수, 1997년 9월 20일 채택)

#### ABSTRACT

For many years concrete has been the major building material for most construction. It is of primary importance that fire fighters or fire investigators have a full understanding of the properties of concrete so that better control of the fire scene is achieved. This, in turn, not only help to ensure a safer fire-fighting job but also a more successful fire investigation. So far as the fire scene investigation in concerned, knowledge about the thermal behaviour of concrete can help the investigators to determine the highest temperature that a particular spot of a fire scene has ever reached thereby providing data which may be of value in reconstructing the course of the fire.

#### 1. 서론

현대 도시의 구조물은 거의 대부분이 콘크리트로 구성되어 있으며 여기에서 발생하는 화재는 사고든 고의든 다양한 형태(가스화재, 전기화재, 일반화재 등)로 발생하고 있다. 화재발생의 다양성에 부가하여 화재시의 공기유동, 현상, 연소물질의 양과 질 및 건물의 구조에 따라 상해나 손실의 정도도 다양하여 화재 진압과정이나

사후 안전진단 및 보수·보강에서 많은 문제점을 내포하고 있는 것이 현실이다.

콘크리트는<sup>1)</sup> 시멘트, 물, 골재(굵은 골재와 잔골재) 및 공기로 구성되어 있으며 시멘트와 물은 골재를 결합하고 공극을 채우는 역할을 하고 수화반응과 규산이석회(Belite);  $(2CaO \cdot SiO_2)$ , 규산삼석회(Alite);  $(3CaO \cdot SiO_2)$ , 알루미늄 산삼석회(Celite);  $(3CaO \cdot Al_2O_3)$ , 알루미늄산철사석회(Felite);  $(4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3)$ 의 경화과정

\* 충북대학교 안전공학과

Table 1. Physiecal characters of cement

Class	Specific weight	Finess modulus (cm/gr)	Setting time				Soundness	Flow value (mm)	Compressive strength		
			Room tem. (°C)	Water tem. (°C)	Initial (h-m)	Final (h-m)			3 day	7 day	28 day
Portland cement	3.15	3,000	25	23	3-10	5-20	good	110	173	208	321

에서 콘크리트의 압축강도와 항복강도는 높아진다.

콘크리트의 수화온도와 동결온도에 대해선 많은 연구가 되어 왔다<sup>2-4)</sup>. 예를들면, 온도가 상승하면 압축강도가 떨어진다는 것은 알려져 있는 사실이며 일반적으로 온도가 100°C에서 표면수가 증발하기 시작하며 탄성력은 10~20%정도 떨어지지만 압축강도는 변함이 없고 300°C를 초과하면 규산수화물은 방출되어 시멘트의 결합력은 떨어지기 시작한다. 압축강도는 450~500°C에서 서서히 떨어지기 시작하여 900°C가 되면 탄산석회(CaCO<sub>3</sub>)는 CO<sub>2</sub>의 유실로 분해되고 압축강도는 "0"이 된다<sup>5-6)</sup>. 온도가 1200°C 이상이 되면 용융이 되어 원래의 형태를 갖지 못하고 여러가지 덩어리 형태로 남는다<sup>7)</sup>.

그러나, 아직 국내에서는 화재 진압과정 및 진압 후 현장조사에서 기본적인 콘크리트 구조물의 성질을 알지 못하고 단순히 현장에서 슈미터해머(경도시험)나 콘크리트코야를 채취하여 실험실에서 강도시험을 하여 안전진단을 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 재료 특성상 국가마다 다른 배경을 갖고 있고 또한 신도시 등에서 문제가 된 바다모래나 골재부족으로 인한 쇄석 사용 등 콘크리트 강도 저하에 제문제점을 갖고 있어 국내에서 생산되는 콘크리트를 고온의 여러조건에서 실험하여 화재건물에 대한 기본적인 자료를 제공함으로써 화재진압이나 진압 후 건물 안전진단 및 보수·보강에 큰 도움을 주고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험체

#### 2.1.1 사용재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재와 굵은 골재는 요즘 건설현장에서 많이 사용하는 한강모래와 굵은골재 최대치수가 20mm인 쇄석을 이용하였다. 사용재료는 한국산업표준규격(KS)을 기준으로 실험하여 각각의 물리적인 값을 구하였다.

Table 2. Physical characters of aggregate

Class	Specific weight	Absorption (%)	F.M. (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Solid volume (%)	Porosity (%)
Fine aggregate	2.53	3	2.3	1531	59.3	40.7
Coarse aggregate	2.61	1.5	6.8	1744	66.8	33.2

#### 2.1.2 시험체 제작

강도 시험용 시험체는 Table 3의 배합비로 하고 압축강도용 시험체는  $\phi 10 \times 20$ cm의 실린더형이며, 휨강도용 시험체는 15×15×53cm의 직육면체형으로 콘크리트를 타설하였다. 양생조건은 공기중에서 24시간 습윤양생을 시킨 후 탈형하여 재령 28일간 수온 20°C에서 수중양생하였다.

Table 3. Concrete mixing design

C <sub>max</sub> (mm)	slump (cm)	air (%)	(w/c) (%)	(s/a) (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
					(W)	(C)	(G)	(S)	admixture (AE)
20	8	6.0	54.9	44	190	346	1004	783	0.85

### 2.2 시험체의 가열 및 냉각

시험체의 가열은 실내화재를 시뮬레이션 하기 위해 LPG 가열로를 이용하였으며<sup>8)</sup>, 시험체

를 양생수조에서 꺼낸 후 캠핑을 하고 각 시험을 동일조건에서 하기 위해 100℃ 건조로에서 24시간 건조시킨 후 가열조건에 맞추어 가스로서 가열하였다. 온도 상승률은  $\beta = 5^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 상승하였으며, 가열온도 조건은 압축강도용 시험체 및 휨강도용 시험체 모두 200, 300, 400, 600, 700, 800, 900℃로 하고 지속시간은 10분과 1시간으로 하였다. 가열 후 시험체의 무게를 측정하고, 온도가 상온상태가 되도록 공기 중에 24시간 동안 충분히 냉각시킨 후 강도실험을 하였다.

### 2.3 시험방법

압축 및 휨강도 시험은 KS F2405와 KS F2408을 따랐다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 잔존 강도

#### 3.1.1 온도 상승률과 강도 변화비

이 실험은 온도상승률에 따라 압축 및 휨강도가 받는 영향을 알아서 본 실험에 알맞는 상승률을 결정하기 위해서 온도조건은 400, 500, 600℃로 하고 가열 지속시간은 1시간으로 하고 기준강도는 상온시 강도로 하였다. Fig. 1에서 온도상승률 값이 낮으면 낮을수록 강도가 낮음을 보여주며 상승률  $\beta = 20^\circ\text{C}/\text{min}$  전후에서 가장 높은 값을 나타내었다. 그 이유는 상승시간과 관련한 것으로 상승시간이 많이 걸려 콘크리트에 축적되는 열량이 많았기 때문이다. 또한, 압축강도는 상승률의 영향을 4~5% 정도 받고 있지만 휨강도는 2~3%로 압축강도보다는 다소 적게 반응을 알 수 있다. 특히 상승률  $\beta = 30^\circ\text{C}/\text{min}$ 에서는 가장 낮은 강도를 보였는데 이것은 온도의 급상승으로 인한 콘크리트 표면에서 폭열현상이 발생하여 전체적으로 강도가 낮았다. 따라서, 콘크리트의 폭열에 의한 박리현상은 급격한 온도상승과 많은 관련이 있음을 보여 준다.

#### 3.1.2. 잔존 압축강도

Fig. 2는 잔존 압축강도 실험으로 상승률 실험

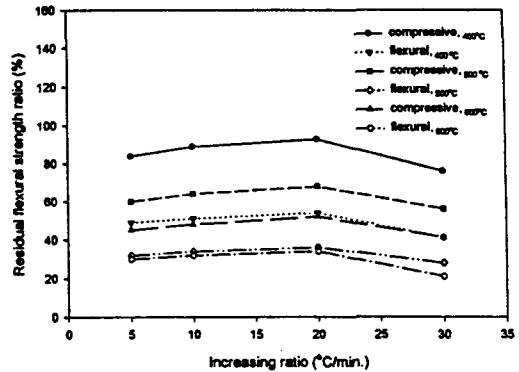


Fig. 1 Temperature increasing rate and residual strength ratio with delay time 60min.

로 실험한 결과 100℃ 압축 시험체의 잔존 강도는 상온시 보다 약 12% 증가하였고, 60분 가열 조건에서는 이 온도에서 가장 높은 잔존 강도를 나타냈다. 200℃의 가열 지속시간 60분에서는 상온시보다 4%정도 증가한 반면, 100℃보다 약 8%가 감소하여 이 조건에서는 100℃~200℃ 사이에 가장 높은 강도 값이 있음을 알 수 있고, 400~500℃에서 약 24%의 강도 감소를 나타내고 특히, 600℃는 상온시 압축강도의 약 55%의 수준이었다.

가열 지속시간 10분은 200℃에서 상온강도보다 약 13%의 강도가 증가하여 가장 높은 잔존 강도를 나타냈고, 300℃는 강도가 약 4% 감소하여 200~300℃에서 가장 높은 강도 값이 있음을 알 수 있으며, 700~800℃ 사이에 약 23%나 감소하였고 특히 600~800℃에서는 전체 강도의 약 38%가 감소하였으며 800℃는 상온강도의 37%를 나타냈다.

따라서, 콘크리트는 700℃ 이상의 열에 10분간만 지속되어도 압축강도는 약 40%나 저하하였으며, 또한 500℃에서 60분 이상 가열되면 40%

Table 4. Residual compressive strength ratio

Delay time(min.)	Heating temperature (°C)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
		10	112	113	109	101	89	75	60	37
60	112	104	96	84	60	45	38	25	15	

의 강도저하가 있었다. 가열 지속시간과 관계없이 900℃ 이상의 열을 받으면 압축강도는 거의 0이었다.

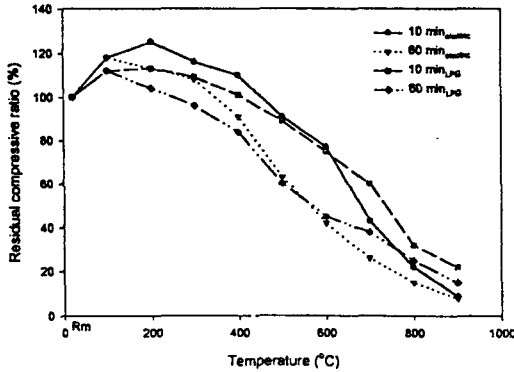


Fig. 2 Residual compressive strength according to heated temperature

### 3.1.3 잔존 휨강도

Fig. 3의 잔존 휨강도 실험에서 강도는 압축강도와는 다르게 콘크리트가 가열되는 즉시 강도가 저하되는 현상을 보였다. 가열 지속시간 60분, 200℃에서는 상온강도의 약 35%로 가장 많이 감소하고 300℃가 되면 40%이상의 감소를 보였다.

가열 지속시간 10분의 경우, 100℃에서는 약 1% 감소하였지만 300℃에서는 약 17% 정도가 감소하여 가장 많이 감소하였고, 특히 400℃가 되면 상온강도의 약 40%나 감소하여 압축강도보다 열에 더 취약하다는 것을 알 수 있었다. 특히, 압축강도는 200℃ 전후에서 강도가 증가하였지만 각 온도별 휨강도는 상온시보다 낮게 나타났다.

Table 5. Residual flexural strength ratio

Heating temperature (°C)	Delay time (min.)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
		96	80	63	60	48	40	30	15	12
	60	65	58	45	33	30	28	14	10	

### 3.1.4 직접화염에 의한 강도 변화율

압축강도용 시험체를 평균온도 약 1000℃의 화염에서 실험한 Fig. 4는 가열 지속시간에 따른

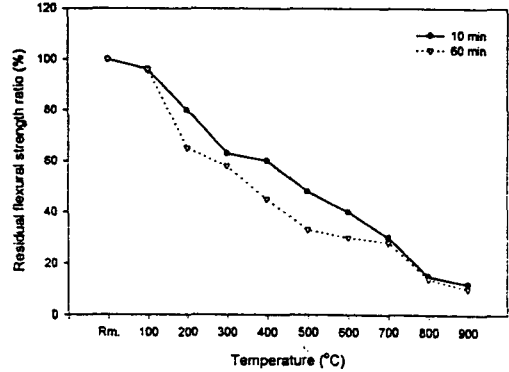


Fig. 3 Residual flexural strength curve according to heated temperature

강도 변화율을 나타내고 있다. 실험결과에서 압축강도는 가열 지속시간이 30분을 경과하면 상온강도의 약 30%가 감소되고 약 50분이 지나면 50%이상의 강도가 저하할 수 있다. 또한 휨강도용 시험체는 10분만 가열하여도 상온강도의 약 30%정도 감소되고 30분이 경과하면 약 70%나 감소하였다 따라서, 화염이 직접 콘크리트에 닿으면 연기나 복사열의 간접가열보다 훨씬 빠르게 저하되는데 그 이유는 10분이 지나면 폭열 현상에 의한 박리와 미세균열이 빨리 발생되고 30분이 지나면 미세균열이 큰 균열로 성장됨과 동시에 속도도 빨라지기 때문이다.

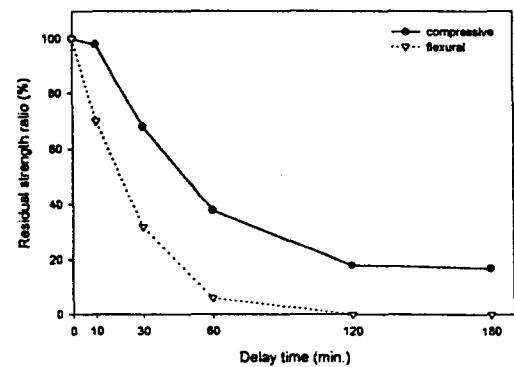


Fig. 4 Residual compressive strength ratio curve by 1000°C fire flame

## 3.2 균열현상

### 3.2.1 간접가열

콘크리트는 외관상 300°C 이상이면 표면에 부분적으로 옅은 핑크색이 발생하는데 이것은 강도의 저하를 나타내는 징후가 되며 그 원인은 모래나 쇄석내의 제일철염(ferrous salts)이 콘크리트 표면에 발현된 것이다. 또한, 가열에 의해 초기의 혼합수가 급격하게 건조됨으로써 소성수축 균열(plastic shrinkage crack)이 발생되며 그 균열 형태는 방사상으로 나타나고 콘크리트의 경화나 건조수축으로 콘크리트를 횡단으로 가로지르는 관통균열(separation cracks)이 발생된다.

압축강도용 시험체는 450°C, 60분 이상이면 표면에 부분적으로 미세 균열이 나타나기 시작하며 Fig. 5와 같이 600°C에서 10분 이상 가열되면 미세균열이 표면 전체로 확산된다. 특히 휨강도용 시험체는 600°C, 60분이면 폭 0.1~0.2mm의 균열이 콘크리트 전표면에 분포한다. 여기서 Fig. 6 (a)는 휨시험의 거북등 형태의 균열로 소성수축으로 인한 균열이며, Fig. 6 (b)는 측면의 관통균열 형태이다.



Fig. 5 Crack phenomenon of compressive strength specimen at 600°C, 60min.

800°C에서 10분 이상 가열되면 되면 전면에는 옅은 적색을 띄며, 최대 0.4mm까지의 균열이 발생하며 측면에는 폭 0.1mm정도의 관통균열이 상당히 많이 성장한다.

또한 900°C 60분이 되면 옅은 적색과 회색이 혼재하고 Fig. 7과 같이 균열은 더욱 성장하여 콘크리트 표면 전체에 최대 폭 0.8mm의 균열이 분포한다.

### 3.2.2 직접가열

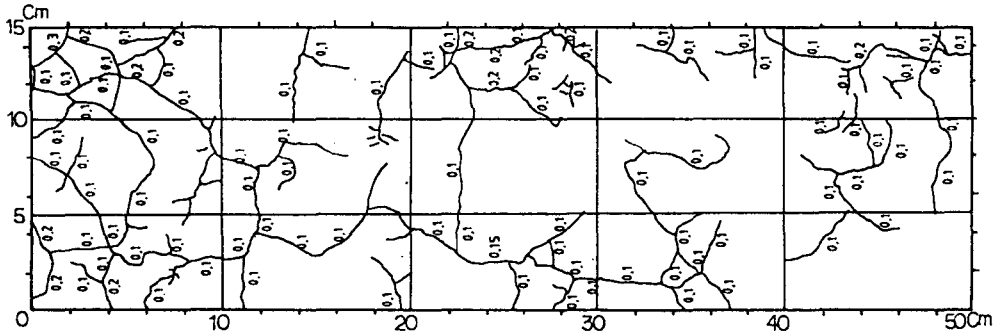
콘크리트에 화염이 직접 닿으면 Fig. 8에서와 같이 폭 0.15mm의 관통균열이 상당히 빨리 성장되고 모서리 부분에는 폭열현상에 의한 박리현상이 있음을 알 수 있고 1000°C, 60분간 가열한 휨강도용 콘크리트는 균열의 폭이 더욱 커지면서 균열이 단면을 관통하였다.

압축강도용 콘크리트는 1000°C 30분에서 표면에 미세균열과 내부의 겔수가 시험체 표면에 흘러 흰분말 형태로 보이며, 60분간 가열하면 적색이 부분적으로 나타나고 균열의 폭과 길이는 더욱 성장되고, 120분간 가열하면 5mm이상의 균열과 적색이 전면에 분포함을 알 수 있다.

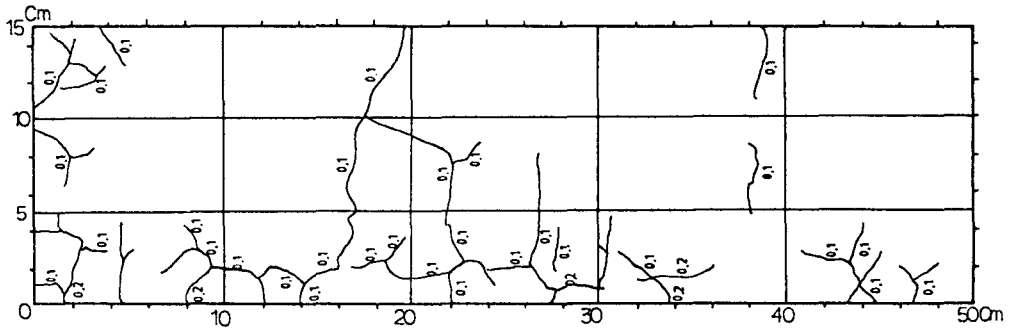
## 4. 결 론

고온에서의 콘크리트 강도 및 외관변화를 알기 위해 LPG로에서 간접가열과 직접가열 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 온도 상승률에 대한 강도변화 실험에서는 압축과 휨강도 모두 상승율이  $\beta = 5^\circ\text{C}/\text{min}$  조건에서 강도가 낮았는데 이것은 온도 상승시간이 많이 지연되어 콘크리트에 축적된 열량이 많아졌기 때문이다.
- 2) 잔존 압축강도 실험에서 가열 지속시간 60분은 100°C에서 강도가 가장 높았고, 400~500°C는 약 24%의 강도 감소가 있었다. 또한 10분은 200°C에서 상온시 보다 약 13%의 강도 증가가 있었고, 700~800°C에서 약 23%나 감소하였다.
- 3) 잔존 휨강도는 모든 온도에서 상온시 보다 강도가 낮으며, 200°C의 가열 지속시간 60분에서는 약 35%가 감소하여 이 온도에서 가장 많이 감소하였다. 10분은 200°C에서 30%



a. Front face



b. Lateral face

Fig. 6 Crack map of flexural strength specimen at 600°C, 60min

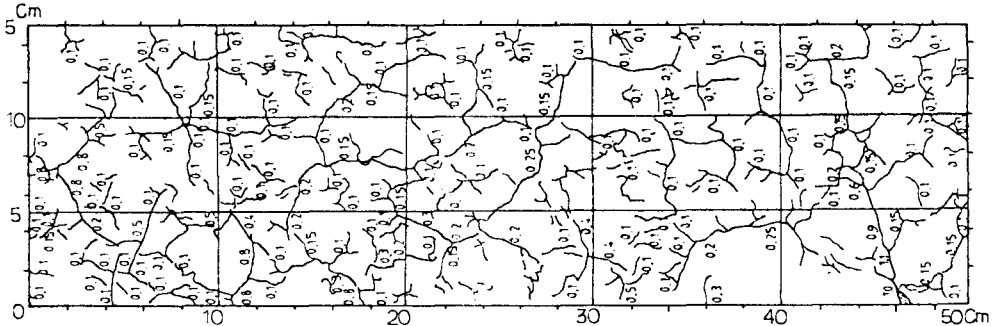


Fig. 7 Crack map of 900°C, 60min. flexural specimen

의 강도 감소가 있었다.

4) 직접화염에 의한 강도 실험에서 압축강도는 지속시간 30분이 지나면 전체 강도의 약 30%, 약 50분이 지나면 50%로 감소하였으며 휨 강도는 가열시간 10분만 지나도 상온강도의 약 30%가 되고 30분이 경과하면 약 70%로 현저하게 감소되었다.

5) 외관현상에서 압축강도용 시험체는 450°C, 60분, 휨강도용 시험체는 600°C, 10분에서 미세 균열이 발생하였다. 이는 소성수축과 경화 및 건조수축 때문이며 직접가열의 경우 30분이 지나면 균열이 발생하여 시간경과에 따라 빠르게 성장되어 강도저하에 큰 원인이 됨을 알 수 있었다.

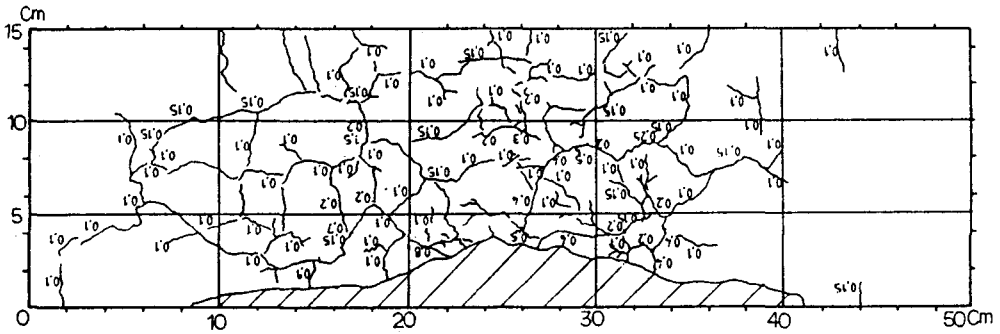


Fig. 8 Cracking map of fire flame with 1000°C, 30min

참고 문헌

- 1) 건설재료학, 문한영, 동명사, 1996.
- 2) Khoury, G. A., Grainger, B. N. & Sullivan, P. J. E., Strain of concrete during cooling under load. Mag. Concrete Res., 38. pp. 3 ~12, 1986.
- 3) Rostasy, F. S. & Sprenger, K. H., Strength and deformation of steel fibrereinforced concrete at very low temperature. Int. J. Cement Compos. Lightweight Concrete, 6/1, pp. 47~51, 1984.
- 4) Faiyadh, F. I. & Al-Ausi, M. A., Effect of elevated temperature on splitting tensile strength of fibre concrete. Int. J. Cement Compos. Lightweight Concrete, 11/3, pp. 175

~178, 1989.

- 5) Schneider, U., Repairability of fire damaged structure. Fire Safety Journal, 16, pp. 251~336, 1990.
- 6) Idorn, G. M., Expansive mechanisms in concrete. Cement Concrete Res., 22, pp. 1039~1046, 1992.
- 7) Wei-Tun Chang, Chen-Then Wang, Chin-Wang Huang, Concrete at temperature above 1000°C. Fire Safety Journal, 23, pp. 223~243, 1995.
- 8) David M. Birk, M. S., P. E., "An Introduction to Mathematical Fire Modeling," Technomic Publishing Co., Inc., pp. 101~107, 1995.