

ACI 직사각형 응력블럭과 실제 응력분포에 부재의 크기가 미치는 영향

Effects of Member Sizes on ACI Rectangular Stress Block and Actual Stress Distribution

이 성 태^{*} 김 장 호^{**} 김 진 근^{***}
Yi, Seong Tae Kim, Jang Ho Kim, Jin Keun

ABSTRACT

It is important to consider an effect of concrete member sizes when estimating the ACI rectangular stress block of a reinforced concrete flexural member. However, the experimental data and analytical analyses are still not available for a proper evaluation. For all types of loading conditions, the trend is that the size of an ACI rectangular stress block tends to change when the member sizes change.

In this paper, the size variations of strength coefficients for ACI rectangular stress block and actual stress distribution have been studied. Results of a series of C-shaped specimens subjected to axial compressive load and bending moment were adopted from references 1 and 2.

The analysis results show that the effect of specimen sizes on strength coefficients for ACI rectangular stress block and actual stress distribution of concrete member was apparent. Thus, the results suggest that the current strength criteria based design practice should be reviewed.

1. 서 론

현재까지도 콘크리트 구조물에 대한 대부분의 설계기준에서는 크기효과를 고려하지 않고 있으나 콘크리트, 암석, 얼음, 세라믹, 및 복합체와 같은 유사취성(Quasibrittle) 재료는 균열의 발생에 의해 최종적으로 파괴되므로 크기효과에 대한 연구는 반드시 수행되어야 한다.

그 동안 유사취성 재료의 압축 파괴거동에 대한 연구는 폭넓게 수행되어 왔으며 압축파괴에서 크기효과는 상당히 뚜렷하다고 알려져 있다. 그러나 인장파괴와 비교해서 압축파괴의 파괴메카니즘과 크기효과에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 최근 들어 김진근 등^{1,2}에 의해 이 분야에 대한 연구가 연속적으로 수행되고 있으며, 이 연구에서 김진근 등^{1,2}은 콘크리트의 압축강도는 부재의 크기에 직접적으로 영향을 받는다고 발표하였다. 그리고 설계에서 사용되는 응력블럭의 크기 또한 부재의 크기에 뚜렷한 영향을 받을 것임을 제시하였다.

* 정회원, 한국전력기술(주) 토목건축기술처 차장
** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수
*** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

최근에 Ibrahim과 MacGregor³는 강도계수인 α_1 과 β_1 이 콘크리트의 압축강도에 의존함을 지적했으며 이 현상은 파괴역학을 이용하여 설명할 수도 있다.

ACI code에 따르면 직사각형 응력블럭의 강도계수인 α_1 은 일정하지만 β_1 은 콘크리트의 압축강도에 따라 변화함을 알 수 있다. 그러나 휨압축력이 가해지는 C형 공시체에 대한 기존의 연구결과에 따르면 α_1 과 β_1 이 부재의 크기에 따라 변화한다고 보는 것이 더 타당함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 구조물의 설계에 널리 사용되는 ACI 직사각형 응력블럭의 크기와 실제 압축응력의 분포에 부재의 크기가 미치는 영향을 검토하고자 한다.

한편, 그림 1에는 C형 공시체와 원주공시체의 크기에 따른 응력-변형률 관계의 대표적인 곡선이 나타나 있다. 여기서 얇은 실선과 굵은 실선은 각각 C형 공시체와 표준 원주공시체에서 얻은 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 공시체의 크기가 작아 질수록 (즉 Size I에서 Size III로 갈수록) 극한 응력, 극한 변형률, 및 극한 응력에 대응하는 변형률이 더 커짐을 알 수 있다. 따라서 응력-변형률 곡선에는 크기효과가 존재하며 ACI 직사각형 응력블럭에도 크기효과가 고려되어야 함을 예상할 수 있다. 여기서 C형 공시체와 원주공시체는 응력-변형률 곡선의 형상과 크기가 원점에서 극한 응력까지 서로 유사함을 알 수 있다. 따라서 현재의 설계기준에서는 원주공시체의 극한강도를 보의 설계 시에도 그대로 사용하고 있으며 현재는 이에 대한 검토가 꼭 필요한 실정이다.

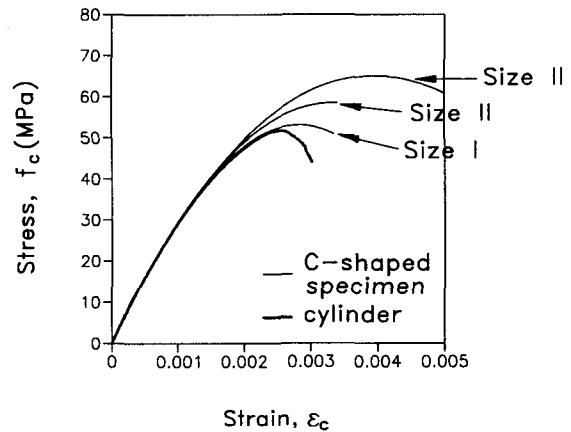


그림 1 대표적인 응력-변형률 곡선¹

철근콘크리트 휨부재의 설계 시에 한국과 미국 등을 포함한 많은 나라에서는 압축응력의 분포로서 직사각형 응력블럭을 사용하고 있다. 여기서는 세계 각 국에서 철근콘크리트 보의 압축부 설계에 사용하고 있는 주요한 기준 (즉, ACI, CSA, CEB-FIP, JSCE, BS 8110, 그리고 EC 2)에 대한 검토를 수행했으며 표 1에는 그 검토결과인 강도계수가 나타나 있는데 BS code를 제외하고는 나라마다 거의 같은 강도계수를 사용하고 있음을 알 수 있다.

표 1 직사각형 응력분포에 대한 강도계수

Code	Strength coefficients	
	Magnitude factor, α_1	Depth
ACI and CSA	0.85	$\beta_1 c$
CEB/FIP Model MC90	0.85	-
JSCE	0.85	-
BS 8110	0.45	0.9c
EC 2	0.85	0.8c

2. 결과의 분석

ACI 직사각형 응력블럭과 실제 응력분포에 부재의 크기가 미치는 영향을 살펴보기 위해 참고문헌 1과 2의 실험자료를 이용하였다.

2.1 실험결과의 정확성에 대한 검토

김진근 등¹에 의해 수행된 연구에서 공시체의 크기 I는 ACI code에서 β_1 을 제시할 때 사용한 공시체와 크기가 같으며, ACI code는 콘크리트의 압축강도(f_c')가 52 MPa일 때 β_1 을 0.68로 주고 있다. 그러나 ACI code에 의해 제시된 이 값은 매우 보수적이며, 실제로 ACI code의 근간이 되는 문헌⁴에 따르면 β_1 이 0.83임을 알 수 있다. 여기서 참

고문헌 1의 공시체 크기 I에 해당하는 극한값들을 아래의 식(1)에 넣어 계산하면 0.82, 0.86, 0.83, 0.84, 0.87, 0.83 등의 값을 얻을 수 있는데 이 값들은 0.83과 큰 차이가 나지 않는다. 따라서 참고문헌 1의 실험결과가 ACI code에서 채택하고 있는 실험결과와 유사한 정확성을 가지고 있음을 알 수 있다.

2.2 ACI에 의해 제안된 β_1 에 대한 검토

그림 2는 공시체의 크기와 식(1)과 식(2)에서 얻은 β_1 의 관계를 나타내고 있는데, 식(1)은 ACI code에서 제시하는 식이고 식(2)는 MacGregor 등³이 제안한 식이다.

$$\beta_{1,ACI} = \frac{P_u}{0.85f'_c \times 12.5 \times d} \quad (1), \quad \beta_{1,Ref.3} = 0.95 - \frac{f'_c}{400} \geq 0.70, \text{ 여기서 } f'_c \text{ in MPa} \quad (2)$$

그림 2에서 중공원, 두꺼운 파선, 및 얇은 실선은 각각 실험결과와 식(1), 및 식(2)로부터 계산된 결과를 나타낸다. 여기서 α_1 은 0.85로 일정하게 했으며, 부재의 크기 들(여기서 크기, 길이, 및 깊이를 통틀어서 “크기 들”로 정의)이 증가함에 따라 β_1 이 감소함을 알 수 있다. 그러나 ACI code에서 제시하는 값보다는 여전히 큰 값을 주고 있다. 한편, MacGregor 등³이 제안한 식은 부재의 크기가 증가할수록 실험결과와 잘 맞음을 알 수 있는데, 특히 부재의 크기가 ACI code에서 채택한 실험체와 같은 경우에는 거의 같은 값을 가짐을 알 수 있다. β_1 에 크기효과가 있는 것은 ACI code에서 채택한 경우와 참고문헌 1과 2의 경우에 실험체의 크기와 굵은팔재의 최대치수가 서로 다르기 때문으로 판단된다.

2.3 직사각형 응력블럭에 대한 강도계수(α_1 과 β_1)의 검토

여기서는 부재 압축부 단면의 중심으로부터 구해진 합력까지의 편심인 e_{cu} 를 이용해서 부재의 크기가 직사각형 응력블럭에 대한 강도계수인 α_1 과 β_1 에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 이들 값은 식(3)과 식(4)에 의해 계산할 수 있으며 그 결과는 그림 3과 그림 4에 나타나 있다. 한편 이들 그림에서 굵은 파선은 ACI code에서 제시하는 값을 나타낸다.

$$\alpha_1 = \frac{P_u}{(c/2 - e_{cu}) \times 2 \times f'_c \times 12.5} \quad (3), \quad \beta_1 = \frac{(c/2 - e_{cu}) \times 2}{c} \quad (4)$$

그림 3에서 α_1 은 부재의 크기나 깊이가 증가함에 따라 감소하지만 부재의 길이가 증가함에 따라서는 오히려 증가함을 알 수 있다. 그림 4로부터 β_1 값은 부재의 크기나 깊이에 따라서는 변하지 않으나 부재의 길이가 증가함에 따라서는 감소함을 알 수 있다. 부재의 길이에 따라 이와 같은 경향이 나타나는 것은 부재의 길이가 증가함에 따라 압축부에서 응력이 더욱 집중되기 때문으로 판단된다. 부재의 길이가 짧은 공시체에서 휨압축파괴는 공시체의 중립축 위의 단면의 많은 부위에 걸쳐서 발생하는 반면, 긴 공시체에서는 보다 제한된 영역에서 발생한다. 이것은 길이가 긴 공시체의 경우, 중립축이 압축연단으로 점점 이동하게 되고 압축영역의 크기가 작게 됨을 의미하므로 α_1 과 β_1 은 부재의 길이가 길어질수록 각각 증가하고 감소하게 된다. 또한 이들 그림으로부터 α_1 과 β_1 은 상호 의존성이 크므로 서로 반비례함을 알 수 있다.

2.4 실제 응력분포에 대한 강도계수(k_3 , k_1k_3 , 및 k_2)의 검토

여기서는 실제응력 분포에 대한 강도계수인 k_3 , k_1k_3 , 및 k_2 에 부재의 크기 들이 미치는 영향을 살

펴보고자 한다. k_3 , k_1k_3 , 및 k_2 는 각각 아래의 식(5), (6), 그리고 (7)로부터 계산되며 부재 크기들과의 관계는 그림 5, 6, 그리고 7에 각각 나타나 있다. 이들 그림에서 굵은 파선은 $k_3=0.85$, $k_1k_3=0.85\beta_1$, 및 $k_2=\beta_1/2$ 를 나타낸다.

$$k_3 = f_{\max} / f_c' \quad (5), \quad k_1k_3 = \frac{P_u}{bcf_c'} = \frac{P_1 + P_2}{bcf_c'} \quad (6), \quad k_2 = 1 - \frac{P_1a_1 + P_2a_2}{(P_1 + P_2)c} \quad (7)$$

k_3 은 원주공시체의 압축강도와 보에서의 최대 압축응력과의 비를 나타내는데, 그림 5에서 이 k_3 는 부재의 크기들이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 여기서 k_3 는 그 자체가 크기효과를 나타낸다. 그림 6에서 원주공시체의 압축강도와 보에서의 평균 압축응력과의 비를 나타내는 k_1k_3 는 공시체의 크기들이 증가함에 따라 감소하는 값을 보이고 있다. 이는 k_1k_3 가 k_3 에 크게 좌우되므로 공시체의 크기에 영향을 많이 받는 것은 당연한 사실이다. 그러나 k_1k_3 는 ACI code에서 제안하는 것보다 여전히 큼을 알 수 있다. 한편, 보에서의 평균응력과 최대응력과의 비를 나타내는 k_1 만의 영향을 보기 위해서는 식 (6)으로부터 k_1k_3 를 먼저 계산해야 된다. 그 후 k_1k_3 를 k_3 로 나누어주면 k_1 이 공시체의 크기에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있을 것이다.

k_2 는 압축연단으로부터 측정된 ACI 직사각형 응력블럭의 중립축 깊이에 대응하는 총 압축력의 깊이를 의미하며 그림 7은 부재의 크기와 k_2 의 관계를 보이고 있다. 여기서 k_2 는 응력-변형률 곡선의 모양에 크게 좌우되며 따라서 콘크리트의 강도에 영향을 받게 된다. 공시체의 크기가 커지면 약간 취성적으로 되므로 k_2 가 작아질 수도 있으나 응력-변형률 곡선의 상승부는 크기에 둔감하므로 크기의 영향이 작게 나타남을 알 수 있다. 이 그림에서 크기효과는 뚜렷이 나타나지 않으나 ACI code에서 제시하는 값보다는 여전히 큰 값을 보이고 있다.

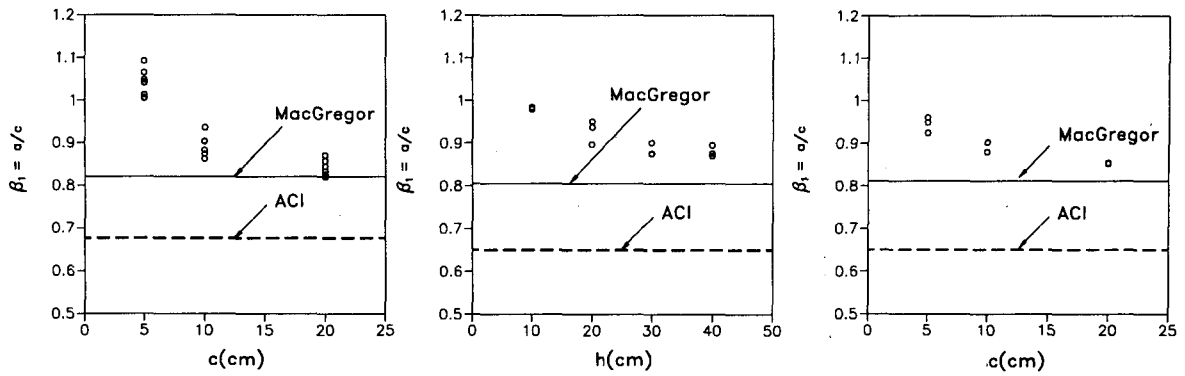
3. 결 론

본 논문에서는 부재의 크기들이 ACI 직사각형 응력블럭의 크기 및 실제 응력분포에 미치는 영향을 검토했으며 그 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- (1) 부재의 크기들이 ACI 직사각형 응력블럭의 크기 및 실제 응력분포에 미치는 영향은 뚜렷하였다. 따라서 실제 설계에서는 ACI 직사각형 응력블럭의 크기가 부재의 크기들에 따라 변화한다는 사실을 고려해야 한다.
- (2) 본 연구의 결과로부터 보다 많은 실험적 연구가 수행되어야 하며 현재 설계에서 사용하고 있는 강도기준이 다시 검토되어야 함을 알 수 있다.

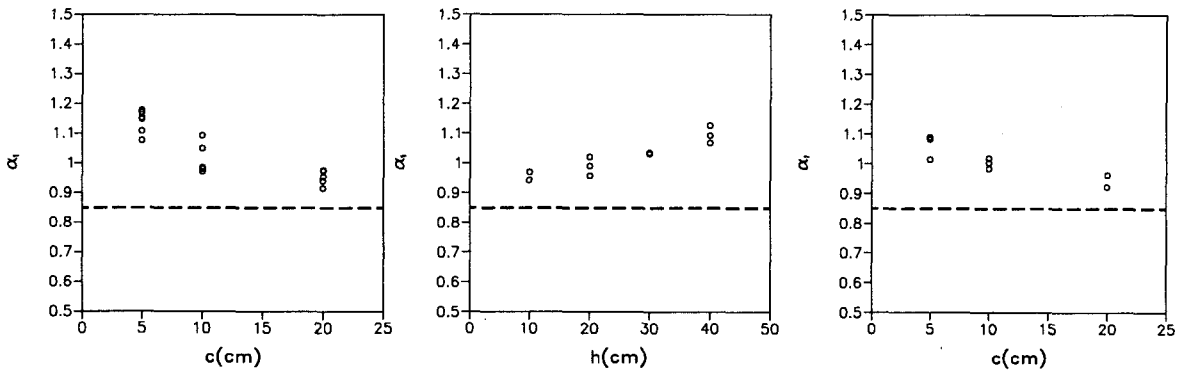
참 고 문 헌

1. Kim, J.K., Yi, S.T. and Yang, E.I., "Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens", ACI Structural Journal, V.97, No.2, Mar.-Apr. 2000, pp.291-296.
2. Kim, J.K., Yi, S.T. and Kim, J.H.J., "Effect of Specimen Sizes on Flexural Compressive Strength of Concrete," ACI Structural Journal, (in print).
3. Ibrahim, H.H.H. and MacGregor, J.G., "Modification of the ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete," ACI Structural Journal, V.94, No.1, Jan.-Feb. 1997, pp.40-48.
4. Nilson, A.H. and Slate, F.O., Structural Properties of Very High Strength Concrete, Second Progress Report, Dept. of Structural Engineering Cornell University, Ithaca, Mar. 1979, pp.62.



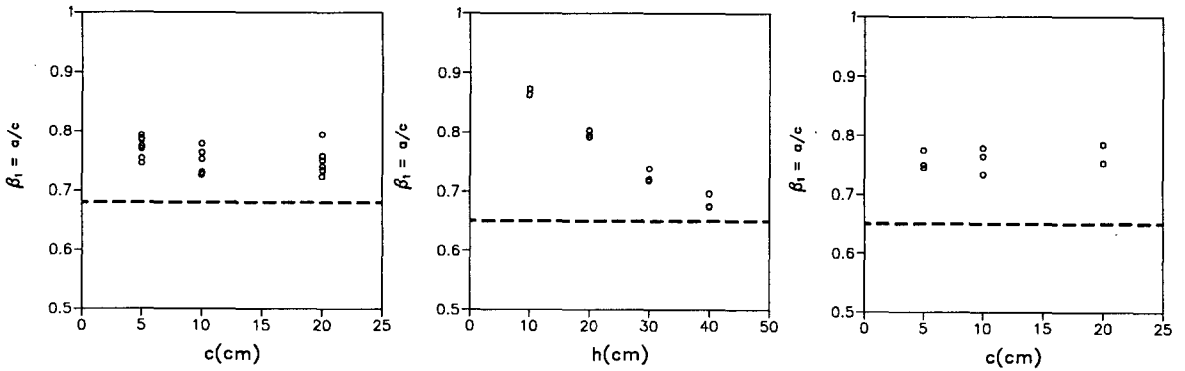
(a) Size effect (b) Length effect (c) Depth effect

그림 2 공시체의 크기와 ACI code에 따른 β_1 의 비교



(a) Size effect (b) Length effect (c) Depth effect

그림 3 공시체의 크기와 α_1 의 비교



(a) Size effect (b) Length effect (c) Depth effect

그림 4 공시체의 크기와 β_1 의 비교

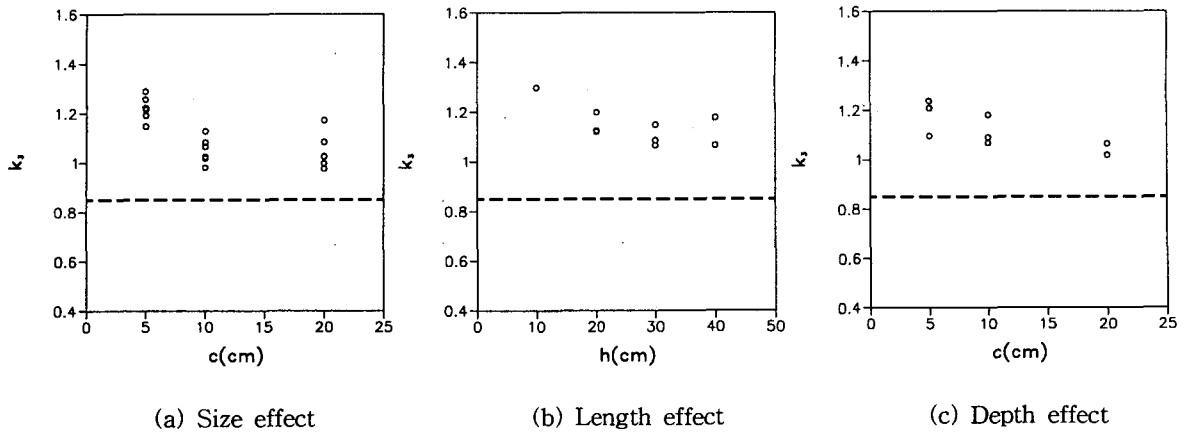


그림 5 공시체의 크기와 k_3 의 비교

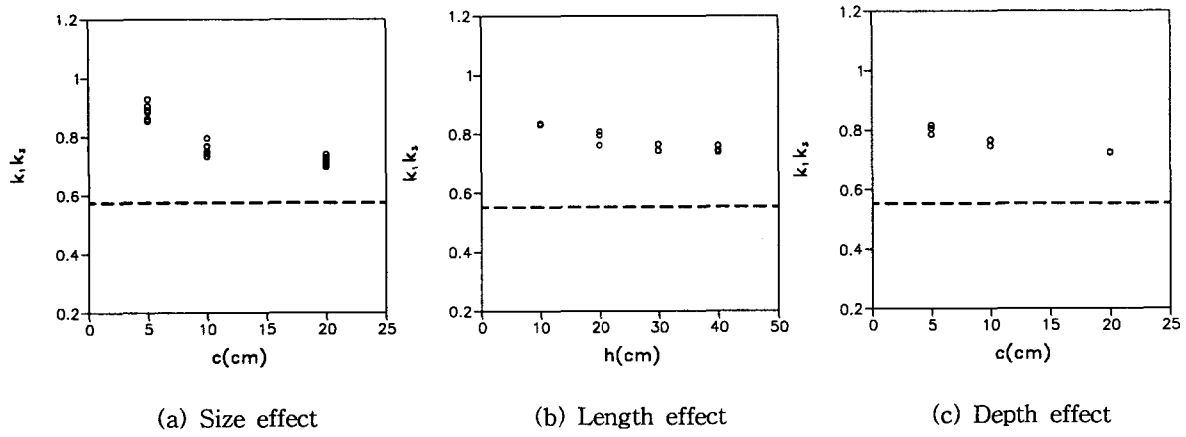


그림 6 공시체의 크기와 k_1k_2 의 비교

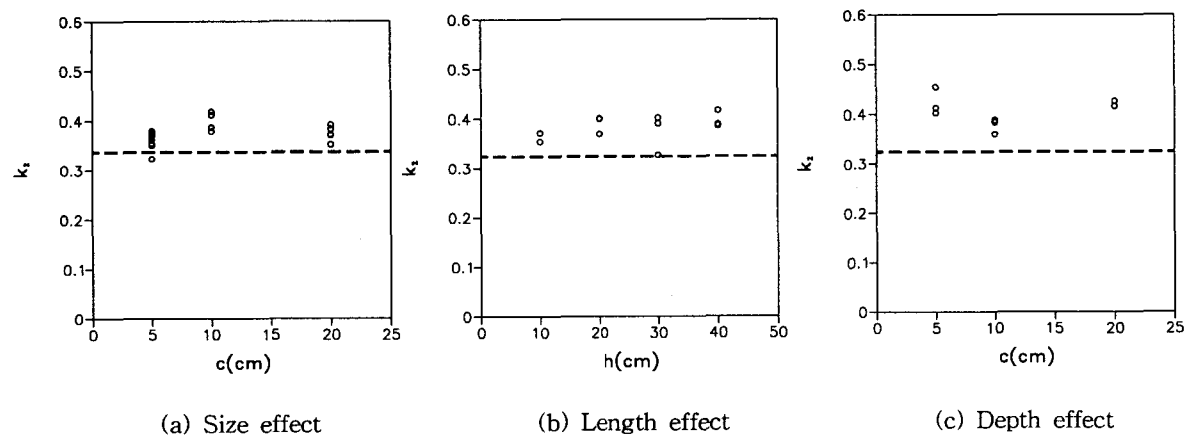


그림 7 공시체의 크기와 k_1 의 비교