

내진설계를 위한 공동주택의 고유주기 측정에 관한 연구

An Study on the Measurement of Natural Period of Apartment for Seismic Design

Dongbaek Kim^{a,*}, Byeonghoon Lee^{b,1}, Kwangjae Lee^{c,2}, Induk Lee^{d,3}

^a *Dep. of Civil Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro, Anseong, Kyeonggi 17579, Republic of Korea*

^b *Dep. of Civil, Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro, Anseong, Kyeonggi 17579, Republic of Korea*

^c *Dep. of Civil, Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro, Anseong, Kyeonggi 17579, Republic of Korea*

^d *Dep. of Civil, Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro, Anseong, Kyeonggi 17579, Republic of Korea*

ABSTRACT

Recently, apartment designs are tend to be changed from the standard pattern by many causes and the beam-column structures are getting popular instead of wall structure system. Therefore, for the effective use of planed space the heights of apartment are tend to be higher and higher. According to Korea Building Code, earthquake resistance designs or seismic design for those high rise apartments must be more attentive and accurate, especially, dynamic periods of structures must be exactly measured, because those are very important for equivalent static analysis. The important subject of this study is to investigate the safety factors and seismic performance for natural period of high rise buildings by comparing the natural periods getting from ambient vibration method with those of Korea Building Code.

KEYWORDS

seismic design
dynamic period
static analysis
safety factor
natural period
ambient vibration

최근 공동주택은 여러 가지 원인에 의해 그 형태가 변화되고 있으며, 구조물도 벽식 형태의 구조물에서 보-기둥 형태의 구조물로 선호도가 바뀌고 있다. 따라서, 계획된 공간을 효율적으로 이용하기 위하여 구조물은 점점 더 고층화 되어가는 경향이 있다. 한국건축구조기준(KBC)에서는 이러한 고층 공동주택의 경우 내진설계 시 지진하중을 산정할 때, 구조물의 진동특성은 매우 신중하고 정밀하게 측정해야 하며, 특히 동적주기는 동적 주기는 이에 상응하는 정적 해석 시 매우 중요하므로 정밀하게 측정해야 한다. 본 연구의 주 목적은 상시 미진동 실험으로부터 얻어진 기타골조식과 전단벽식을 고려하는 경우 고층빌딩의 고유주기를 한국건축구조기준의 값과 비교하여 안전계수를 산정하고 내진성능을 평가하여, 보다 경제적인 내진설계방안을 제시하는 것이다. 또한, 연구결과 기타 골조 식은 매우 보수적으로 주기를 산정하는 것으로 나타나므로 내진설계 시 이러한 사항도 고려해야 할 것으로 사료된다.

내진설계
동적 주기
정적해석
안전계수
고유주기
상시 미진동

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-10-2355-5143. Fax. 82-31-678-4674.

Email. dbkim@hknu.ac.kr

1 Tel. 82-10-5213-0280. Email. bhlee3789@naver.com

2 Tel. 82-10-6381-6940. Email. jae3470@hanmail.net

3 Tel. 82-10-2247-3470. Email. lid555@naver.com

ARTICLE HISTORY

Received Oct. 27, 2015

Revised Nov. 04, 2015

Accepted Nov. 10, 2015

1. 서론

지진은 대비하기 가장 어려운 재난 중에 하나이며 우리나라의 경우도 근래 진도 3 이상의 지진이 다수 관찰되고 있으므로 이에 대한 대책이 필요하다. 이에 건설교통부에서는 일정규모 이상의 건축물에 대하여 내진설계를 의무화하였는데, 현재 실무에서 사용되고 있는 내진설계의 기본개념은 구조물의 고유의 특성을 이용하여 구조물의 저항성 개념으로 설계하고 있다. 또한, 90년대 후반부터 필로티형식의 공동주택과 20층 이상의 고층빌딩이 많이 건설되었으나 구조설계기준에서는 이를 적절히 반영하지 못하여 불안한 부분이 존재하고 있다. 특히 설계 시 구조물의 동적특성요소를 반영하는 주기는 해외의 자료를 근거로 계산함으로써 우리나라의 실측결과와 상당한 차이가 있다. 구조물의 진동특성을 정밀하게 평가하기 위한 방법은 상시 미진동 실험, 강제진동실험, 자유진동실험, 지진응답 관측, 풍 응답 등이 있으며, 이중 상시 미진동 실험은 가진 원이 없이 구조물의 기본 진동주기 측정이 가능하므로(R.D Marshall, L.T. Phan and M. Celebi, 1994), 본 연구에서는 상시 미진동 실험을 통하여 철근콘크리트 벽식 구조물의 진동주기를 측정하고 이를 기존 주기 식에 적용하여 현재 설계기준에 적용하여 지진하중을 산정할 때, 적절한 지진하중이 산정되는지에 대한 연구를 수행하였다. 이에 본 연구에서는 내진설계의 기본이 되는 공동주택 및 고층빌딩의 고유주기를 측정하여 내진성능을 평가하고 보다 경제적인 내진설계방안을 제시하고자 한다.

2. 연구동향

비구조요소에 의한 기본진동주기의 영향은 일반적으로 구조물의 모델링과정에서 무시되는 비구조재인 끼움벽의 강성 증가에 의한 구조물의 주기에 미치는 영향 평가하며, 채움벽(전단벽)은 등가의 대각 브레이싱로 치환하여 모델링하고, 슬래브는 4-절점 플레이트 요소로 모델링하여 휨강성 효과를 고려하는데. 이때 해석변수로는 기둥강성, 경간 길이, 경간의 수로 설정하였다(Li-Hyung Lee, Kug-Kwan Chang, Young-Soo Chun, 2000).

전단벽을 고려하지 않는 경우 고유치 해석에 의한 주기는 실제 규준에 의한 주기보다 매우 큰 값으로 나타나며, 전단벽의 효과를 고려하는 경우는 실제 규준과 유사한 주기를 나타냄으로, 골조구조물의 주기산정식이 비교적 합리적인 것을 확인할 수 있다. 그러나 기둥의 강성, 경간 길이, 경간 수 등이 어느 정도 구조물의 주기에 영향을 주므로 이의 효과가 주기산정 식에 고려될 필요가 있다. 전단벽의 비율 및 배열방식에 따른 주기변화를 살펴보면, 배열방식은 주기에 큰 영향이 없으며, 단순히 전단벽의 비율에 따라 주기가 변화함을 알 수 있다.(Khan Mahmud Amanat, Ekramul Hoque, Engineering Structures, 2006)

골조형식의 구조물의 진동주기에 대해 살펴보면 RC 골조구조물의 경우 48m(약 16층 높이)까지는 약산식의 하한치와 유사하나, 48m를 초과하는 구조물의 경우는 약산식에 의한 주기값이 측정값보다 매우 작게 나타나고 있다. 또한, 지반 가속도가 0.15g 이상인 경우에는 지반가속도가 증가하면 주기가 증가하는데, 이는 RC구조물의 균열발생으로 인한 강성 저하 효과 때문이다. 또한, 모든 경우에 대하여 측정값이 약산식에 의한 주기값 보다 크게 나타나는데, 이는 현재 사용 중인 약산식이 강한 지반가속도 수준에서는 지나치게 짧은 주기를 제공하므로 수정될 필요가 있음을 의미한다.

철골 골조의 경우 37m 까지는 측정값과 규준식에 의한 주기값이 거의 일치하나 37m 이상 되는 구조물에 대하여는 규준식에 의한 주기 값이 약 20-30%가량 짧아진다. 또한, 많은 철골구조물에 있어 규준식이 너무 보수적임을 알 수 있으며, 지반가속도가 0.15g이상인 경우에도 RC구조물과 다르게 0.15g이하인 경우와 큰 차이가 없으며, 철골구조물의 주기는 지반가속도의 크기가 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. (Rakesh K. Goel, Anil K. Chopra, 1997)

3. 철근콘크리트 벽식 구조물의 주기 산정

3.1 주기 산정식

본 연구에 적용된 주기식은 5가지로서 KBC-2009에 제시된 식이고, KBC-2009의 기본 적용 개념식인 레일리-리츠에 의한 주기산정과 비교하여 검토하였으며, 주기식의 상세한 내용은 다음과 같다.

KBC-2009의 철근콘크리트 골조에 대한 주기식은 $T_a = C_T h_n^{3/4}$ 이며, 여기서 $C_T = 0.073$ 이다. KBC-2009의 기타

구조물에 대한 주기식은 $T_a = C_T h_n^{3/4}$ 이며, $C_T = 0.049$, h_n 는 건물의 최하단 부터 최상층까지의 높이(m)를 의미하며, KBC-2009의 간편식은 $T_a = 0.1N$, N 은 층수이다.

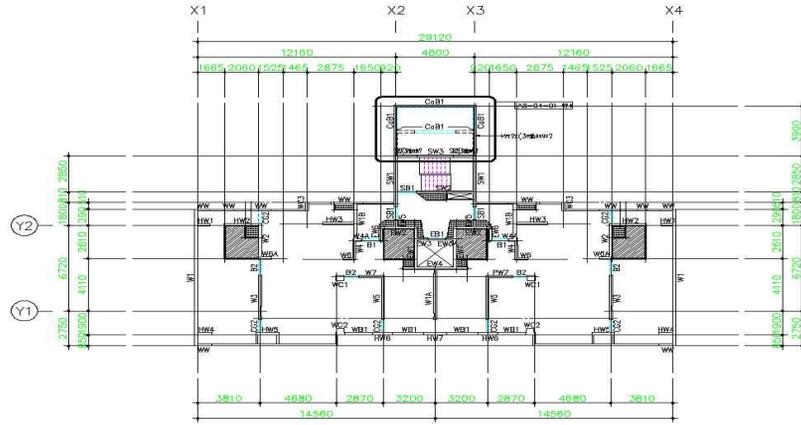


Fig. 1. Floor Plan of Structure

철근콘크리트 골조와 철골 모멘트 골조에서 12층을 넘지 않고 층의 최소높이가 3m 이상일 경우 KBC-2009의 전단벽에 대한 주기식은 $T_a = 0.0743(h_n)^{3/4} / \sqrt{A_c}$ 이며, $A_c = \sum A [0.2 + (D_e/h_n)^2]$, $D_e/h_n \leq 0.9$ 이다. 또한, 레일리-리츠법에 의한 주기산정식은 $T = 2\pi \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2\right) \div \left(g \sum_{i=1}^n f_i \delta_i\right)}$ 이며, 여기서, f_i 는 i 층의 등가정적힘, δ_i 는 등가 정적힘에 의한 변형, w_i 는 각 층의 무게를 의미한다. Table1.과 같이 동일한 공동주택에 대하여 KBC-2009에서 제시되는 4개의 주기산정식과 레일리-리츠의 주기식을 적용해 본 결과 X방향기준으로 0.564초에서 2.082초까지 측정되어 지진하중 산정 시 동적효과를 고려할 경우, 기본변수가 4배정도 차이가 나고 있다. 따라서, 우리나라 공동주택에 있어서 전단벽식에 대한 주기 산정식을 그대로 적용하기에는 큰 무리가 따를 것으로 판단되므로 진동주기산정의 방법을 재검토할 필요성이 있다고 사료된다.

Table 1. Estimated Periods of Structures

적용구조물의 식	주기의 계산결과		적용식의 상세내용
	X	Y	
RC 골조식	1.410		$T_a = 0.073h_n^{3/4}$
기타 골조구조식	0.952		$T_a = 0.049h_n^{3/4}$
간편식	1.912		$T_a = 0.1N$
전단벽식	0.564	0.343	$T_a = 0.0743(h_n)^{3/4} / \sqrt{A_c}$
레일리-리츠식	2.082		$T = 2\pi \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2\right) \div \left(g \sum_{i=1}^n f_i \delta_i\right)}$

3.2 실제 구조물에 대한 주기의 측정

본 연구에서 수행한 주기 측정방법은 상시 미진동 실험인데, 이 측정법은 건축물이 상시에 가지고 있는 미진동을 측정하여 고유주기를 측정하는 방법으로 건축물에 손상을 주지 않는다는 장점을 가지고 있으며, 장시간의 데이터 측정을 통하여 많은 양의 스펙트럼평균이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 미진동에서의 스펙트럼은 실제 설계를 위한 지진 시

에 비하여 그 거동이 매우 작아서 실제 지진시보다 강한 강성하에서의 건축물의 거동을 측정하게 되어 실제거동보다는 보수적인 결과치를 얻게 될 우려가 있다. 또한 상시미진동의 측정을 위해서는 보다 분해능이 높은 센서를 요구하게 되는데, 그 진폭이 10-5g이상의 진폭을 측정할 수 있는 분해능이 높은 센서를 필요로 한다(James L, Beck, B. Scott May, David. C. Polidori, Michale W. Vanok, 1999).

실제 주기측정에 대한 연구를 수행 한 공동주택은 근래 수도권 일대에 신축되고 있는 공동주택에 대하여 수행하였는데, 이 건물은 KBC-2009에 의한 전단벽식 구조물의 기준식으로 주기를 산정하고 적용성을 비교하기 위하여 건축물의 주기를 실측해 보았다. 실측대상구조물은 전용면적 84m²의 2세대가 연결된 17층의 정형 구조물로서 높이는 50m, 층고는 2.8m이다. 실험은 장비를 설치한 후 측정기기 주변의 노이즈에 의한 진동을 최대한 저감시킨 상태에서 진행해야 한다.

측정장비는 서보형 가속도계(Servo type acceleration meter) 센서를 사용하였으며, 데이터의 기록은 4채널용 V1H1 카드를 사용하였다(Table 2). 계측장치는 건물의 옥상바닥에서 설치했으며, 가속도계 센서는 1건물의 단면 및 장변방향 2채널을 설치한 후, 건물에 발생하는 전단력의 영향을 알아보기 위하여 측정위치와 대칭되는 지점에서 측정방향으로 1채널을 추가로 취득하여 총 3개 채널로 측정을 실시하였다. 구조물이 가지고 있는 진동특성을 보다 정확히 측정하기 위해서는 저층부와 고층부 및 최상층에서 건물의 1차, 2차, 3차 모드를 측정해야 하지만 가속도계의 설치에 한계가 있어 지배모드인 1차 모드에 대한 측정만 실시하였다. 1차 모드의 측정값은 최상층에서 가장 큰 진폭으로 나타나므로 각 건물의 최상층에 센서를 위치시키고, 20분씩 3회를 측정하였다(Fig. 2).

Table 2. Main features of Measuring Instrument

계측기기	모델명	주요제원
가속도계	ES-U2	<ul style="list-style-type: none"> · Type: Servo Type · Bandwidth: DC to 200 Hz · Full-scale range : ± 0.25g, ± 0.5g, ± 1g, ± 2g
데이터 로거	Netpod 4003	<ul style="list-style-type: none"> · V1H1 카드 (Force Balance Type) 측정모듈

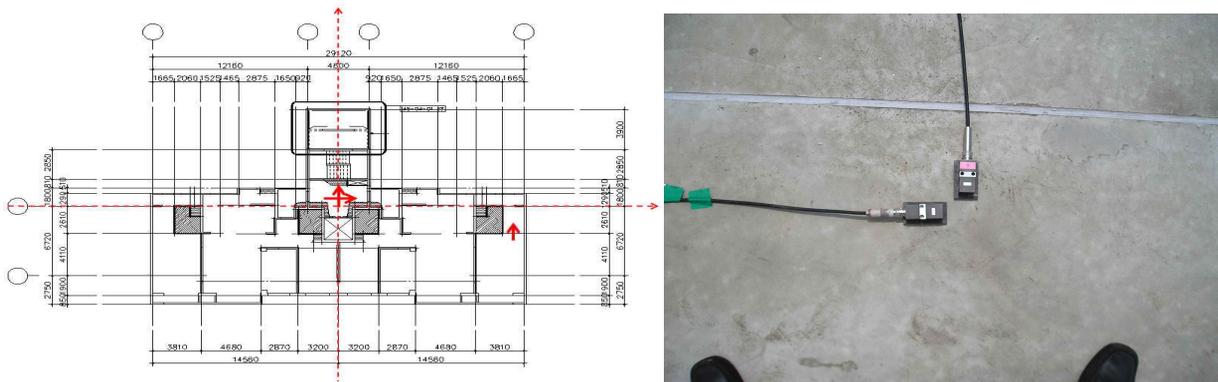


Fig. 2. Situation of Measuring Point and Accelerometer

3.3 상시 미진동 실험 측정결과

각 구조물의 상시 미진동을 3회씩 측정한 고유 진동수 값의 결과를 평균낸 후, 그 역수를 취하여 고유주기 값을 얻었는데, 측정된 데이터 값의 양상은 Fig. 3에 나타내었다. 각 그림의 위쪽에는 각 센서의 시간 - 가속도 파형을 보여주고 있으며, 아래쪽에는 측정된 데이터를 FFT변환한 값을 보여주고 있다. 실험초기 주변의 노이즈에 의하여 데이터 값이 다소 한쪽으로 흐르는 오류가 나타났으나 진동수에는 영향이 없는 것으로 판단되어 재실험을 진행하지 않고 그대로 사용하였으며, 측정된 고유진동수와 고유주기는 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Test Results of Natural Frequency and Period

측정 구조물	측정진동수(Hz)		기본 진동주기(s)	
	약축	강축	약축	강축
측정값	1.21	1.93	0.83	0.52

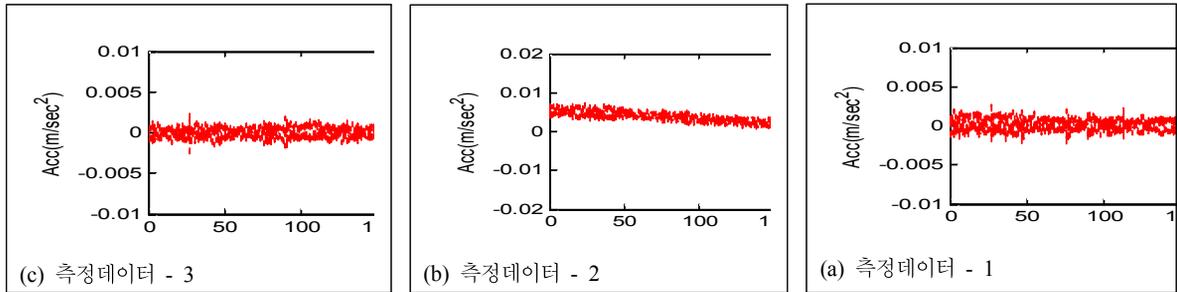


Fig. 3 Time Histories and Natural Frequencies of Structure

3.3 기존 주기식의 적정성 비교 검토

본 실험에서 측정된 결과를 국내 구조물의 내진설계 시 적용되는 주기식에 적용하여 비교하여 보았다. 이 중 KBC-2009에 제시된 기타구조물의 식을 고려하였을 경우인 식(1)과 본 실험결과를 적용하여 Fig. 4에 나타내었다.

$$T_n = 0.0488H^{(3/4)} \quad (1)$$

데이터 표시이 원형 형태는 장변축에 대한 진동모드에 의해 측정된 결과를 나타낸 것이며, 사각형 형태는 단변축에 대한 진동모드에 의해 측정된 결과를 나타내고 있다. 이를 보면 설계기준에 의한 기존주기식보다 높은 값을 나타내고 있어 보수적인 주기산정 값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 최근 많이 건설되고 있는 20층 이상의 고층아파트의 경우 주기산정 시 KBC-2009의 간편식을 사용할 경우 지나치게 보수적으로 설계를 수행하는 결과를 가져올 것으로 판단된다. 또한, 본 실험에서 측정된 결과를 KBC-2009에 제시된 전단벽식 구조물로 고려하였을 경우는 식(2)를 적용하여 Table 4에 나타내었다.

$$T_a = 0.0743(h_n)^{3/4} / \sqrt{A_c} \quad A_c = \sum A_e [0.2 + (D_e/h_n)^2], D_e/h_n \le 0.9 \quad (2)$$

여기서, A_e 는 1층에서 지진하중 방향에 평행한 전단벽의 전단 단면적(m²)을, D_e 는 1층에서 지진하중 방향에 평행한 전단벽의 길이(m)를 나타낸다. Table 4에 나타난 바와 같이 계측주기와 기준식에서 산정하는 주기는 약 3%~25% 정도의 오차가 발생하고 있으며 기준식이 보다 더 보수적인 값을 가지고 있다. 연구결과에 따르면 장변방향은 실제 건물의 기본주기를 안전측으로 나타내고 있으며, 장변방향은 기준식의 주변에 잘 매치되고 있어 구조물의 고유주기 산정 시 전단벽의 유무와 그 비율은 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

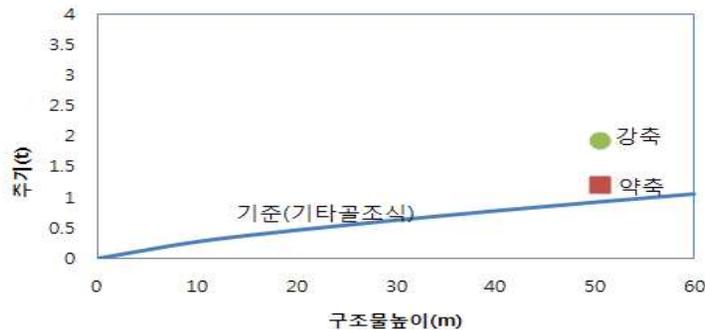


Fig. 4. Comparison of Estimated and Measured Period(Frame)

Table 4. Comparison of Estimated and Measured Period(Shear Wall)

측정건물	실측된 주기값		기준식(전단벽식)에 의한 주기값	
	장변	단변	장변	단변
IM-2	0.52	0.83	0.7	0.85

4. 결론

사회의 도시화로 국민들이 공동주택을 선호하면서 다양한 요구들이 발생되고 있으며, 건설업계에서는 다양한 평면 및 초고층화로 이러한 요구들을 만족시키고 있다. 이에 다양한 구조시스템이 혼재하게 되고, 특히 지진 하중 시 산정되는 주기식의 적용에 혼란을 가져오는 경우가 발생하고 있다. 이에 본 연구에서는 높이에만 의존하는 약산식에 대한 검토 후, 실측을 통한 검증을 수행하였으며 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 철근콘크리트 벽식 구조물에 대한 기존 주기 산정식을 적용하여 본 결과 최대 4배정도의 편차가 발생하므로, 적용식에 따라 지진하중의 크기가 매우 클 것으로 판단된다. 초고층 철근콘크리트 벽식 구조물은 이전의 구조형식보다 골조가 추가되는 등 매우 복잡하므로, 기존의 간편식을 사용하는 것보다 해석에 의한 주기식을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

(2) 지진하중 산정 시 사용하는 주기값은 철근콘크리트 골조식의 경우 기존 기타골조식이나 전단벽식의 경우 모두 보수적인 값으로 산정되므로 설계 시 사용하기에 적절한 것으로 나타났다. 하지만 기타골조식을 적용할 경우 강성의 차이는 발생하지 않는 반면, 전단벽식의 경우 벽체의 강성을 고려하여 보다 정확한 값을 산정하는 것으로 나타났다.

References

R.D Marshall, L.T. Phan and M. Celebi, "Full-Scale Measurement of Building Response to Ambient Vibration and the LOMA PRIETA Earthquake" Proceedings - 5th US national conference on Earthquake Engineering, Vol. 11, pp. 661-670, 1994.

Li-Hyung Lee, Kug-Kwan Chang, Young-Soo Chun, Experimental formula for the fundamental period of RC buildings with shear-wall dominant systems, The Structural Design of Tall Buildings, Vol.9, pp. 295-307, 2000.

Khan Mahmud Amanat, Ekramul Hoque, A rationale for determining the natural period of RC building frames having infill, Engineering structures, V.28, pp. 495-502, 2006.

Rakesh K. Goel, Anil K. Chopra, Period Formulas for Moment-Resisting Frame Buildings, Journal of Structural Engineering, 1997.

James L, Beck, B. Scott May, David. C. Polidori, Michale W. Vanok, Ambient vibration surveys of three steel-frame buildings strongly shaken by the 1994 northridge earthquake, California institute of Technology Report EERL No. 95-06, 1999.

Park, J. H., Lee, T.H., Effect of Uncertain N-values to Seismic Performance Evaluation of Underground Structures, Journal of The Korean Society of Disaster Information, Vol.6 No.2, 2010