

# 해석방법에 따른 교량 구조물의 비선형지진응답 비교연구 Comparative Evaluation of Nonlinear Seismic Responses of Bridge Structures Using Different Analysis Technique

권경일\*                      조양희\*\*                      김재석\*\*\*  
Kwon, Kyong il              Joe, Yang Hee              Kim, Jae Suk

## ABSTRACT

Nonlinear responses of structures may be obtained through three different methods. They are time-history analysis techniques, response spectrum method, and R-factor method. The nonlinear response spectrum method is frequently used in the practice, because the time history analysis method is time-consuming and complicated. There are two different approaches in obtaining the nonlinear response spectrum, which results in "constant displacement ductility spectra" and "constant damage spectra", respectively. The nonlinear response spectra of the various time-histories had been computed and the results were comparatively evaluated in this study. The study results showed that the existing constant displacement ductility spectra can induce unconservative design especially for the structures on soft soil base. This unconservatism can be removed by using the newly proposed constant damage spectra.

## 1. 서론

구조물의 설계에 있어서 지진하중은 상시하중과 달리 발생빈도가 지극히 낮다. 이와 같은 하중 하에서 구조물이 선형거동을 하도록 설계하는 것은 비합리적, 비경제적인 설계가 된다. 일반적으로 구조물은 기능수행수준에서는 선형거동을 하는 반면 붕괴방지 수준에서는 상당한 비선형 거동을 유도할 수 있도록 설계하고 있다. 동하중에 의한 비선형거동의 응답을 구하기 위해서는 원칙적으로 재료의 비선형모델을 사용하여 시간영역에서의 직접적분을 통해서 만이 정확한 비선형거동의 예측이 가능하지만 그 과정이 복잡하고 어렵기 때문에 실무에서는 개략적으로 비선형응답을 얻을 수 있는 근사해법에 의존할 수밖에 없다. 그 대표적인 방법이 응답수정계수(R-factor)법이다. 이 방법은 간편한 반면 구조물의 비선형응답을 정확하게 고려할 수 없다. 이에 비하여 비선형응답스펙트럼을 이용하는 방법은 응답수정계수법에 비하여 상대적으로 신뢰성이 높은 근사적인 비선형응답을 예측할 수 있다. 현재 사용 중인 비선형응답스펙트럼방법은 작성된 선형응답스펙트럼을 구조물의 변위연성비를 사용하여 변형시키는 방법으로 실무에서도 많이 사용되고 있다. 현재 유럽 등에서는 재료의 비선형을 고려하여 일정변위연성비를 갖는 모델을 사용한 일정변위연성스펙트럼<sup>(1)</sup>(constant displacement ductility spectrum)을 사용하고 있다. 그러나 이 방법 또한 선형스펙트럼을 변형시켜 사용함으로써

\* 명성엔지니어링 구조부  
\*\* 인천대학교 교수  
\*\*\* 명성엔지니어링 구조부

입력지진크기에 따른 재료의 비선형성을 정확히 고려할 수는 없다. 따라서 구조물의 동적 거동 간에 발생하는 비선형 반복변형에 따른 누적손상을 좀더 효과적으로 고려할 수 있는 일정손상스펙트럼<sup>(2)</sup>(constant damage spectrum)을 이용한 설계방법의 필요성이 제기되고 있다. 이 연구에서는 이와 같은 일정손상스펙트럼의 현황을 분석하고 그 적용가능성을 확인하기 위한 비교연구를 수행하였다.

## 2. 교량의 비선형 지진거동

### 2.1 응답수정계수법

응답수정계수는 구조물이 항복상태이후에도 추가적인 저항능력이 있음을 고려하여 경험적으로 개발되어 왔다. 구조물 설계시 지진에 대한 설계모멘트를 산정할 때, 응답수정계수(R)는 분모의 항으로 설계모멘트의 크기를 감소시키는 설계지진력 저감계수라고 할 수 있다. 국내 구조물의 내진설계 기준은 UBC규준<sup>(3)</sup>(Uniform Building Code)과 ATC 3-06<sup>(4)</sup> (Applied Technology Council) 보고서를 참고로 하여 1987년에 작성되었으며, 1992년에 개정된 도로교표준시방서<sup>(5)</sup>에 처음으로 교량에 대한 내진설계편이 도입되었다. 1997년에는 교량에 대한 상위개념 내진설계기준이 개정, 발표되었고, 그후 2000년에는 도로교설계기준<sup>(6)</sup>에서 새로운 내진설계요건을 보완하였다. 표 1의 응답수정계수는 탄성 해석으로 얻어진 탄성부재력을 수정하는데 사용된다. 응답수정계수 값은, 설계지진력에 의해 기둥은 항복하나 연결부위 및 기초부분은 극히 적은 손상을 입는다는 가정으로부터 얻어진다.

표 1 국내내진설계기준의 응답수정계수

하 부 구 조	R	연 결 부 분*	R
벽식교각	2	상부구조와 교대	0.8
철근콘크리트 말뚝가구(Bent)			
1. 수직말뚝만을 사용한 경우	3	상부구조의 한 지간내의 신축 이음	0.8
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	2		
단일 기둥	3	기둥, 교각 또는 말뚝가구와 캡빔 또는 상부구조	1.0
강재 또는 합성강재와 콘크리트 말뚝가구		기둥 또는 교각과 기초	1.0
1. 수직말뚝만을 사용한 경우	5		
2. 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우	3		
다주 가구	5		

주 : (\*) 연결부분은 부재 간에 전단력과 압축력을 전달하는 기구를 의미하며, 교량받침과 전단키가 이에 해당된다. 이때, 응답수정계수는 구속된 방향으로 작용하는 탄성지진력에 대하여 적용된다.

### 2.2 응답스펙트럼해석법

비선형응답스펙트럼이란 비선형특성을 갖는 단자유도계가 특정 입력운동을 받는 경우의 응답을 사용하여 구한 고유주기별 최대응답을 도표화 한 것이다. 현재 사용 중인 비선형응답스펙트럼방법은 구조물의 변위를 일정한 목표연성비로 가정하고 변위를 제한하여 작성하는 방법으로 선형스펙

트럼을 변형시켜서 작성하는 방법과 비선형 재료모델을 사용하여 작성하는 방법이 있다. 원칙적으로 응답스펙트럼해석은 중첩이론(모드중첩)을 사용하기 때문에 선형해석에 한정하여 사용될 수 있지만, 비선형응답스펙트럼을 사용하여 근사적인 비선형시스템의 응답을 구할 수 있다. 이와 같은 비선형 응답은 일반산업시설 등의 설계를 위해 실무에서 요구되는 정밀도를 만족시킬 수 있기 때문에 복잡한 정밀 비선형해석 대신에 자주 사용되고 있는 방법이다.

1970년대 초 이래 이와 같은 비선형응답스펙트럼 작성에 관련된 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 이들 방법 중 실무에서 가장 선호되고 있는 방법에는 1982년 Newmark & Hall<sup>(7)</sup>이 제시한 방법으로서, 이 방법은 기 작성된 선형응답스펙트럼을 적절히 수정하여 비선형응답스펙트럼으로 변환시키는 방법이다. Newmark & Hall의 비선형응답스펙트럼 작성방법은 다음 그림 1과 같다. 응답스펙트럼 해석법에 대한 자세한 내용은 아래 3항에서 기술하고 있다.

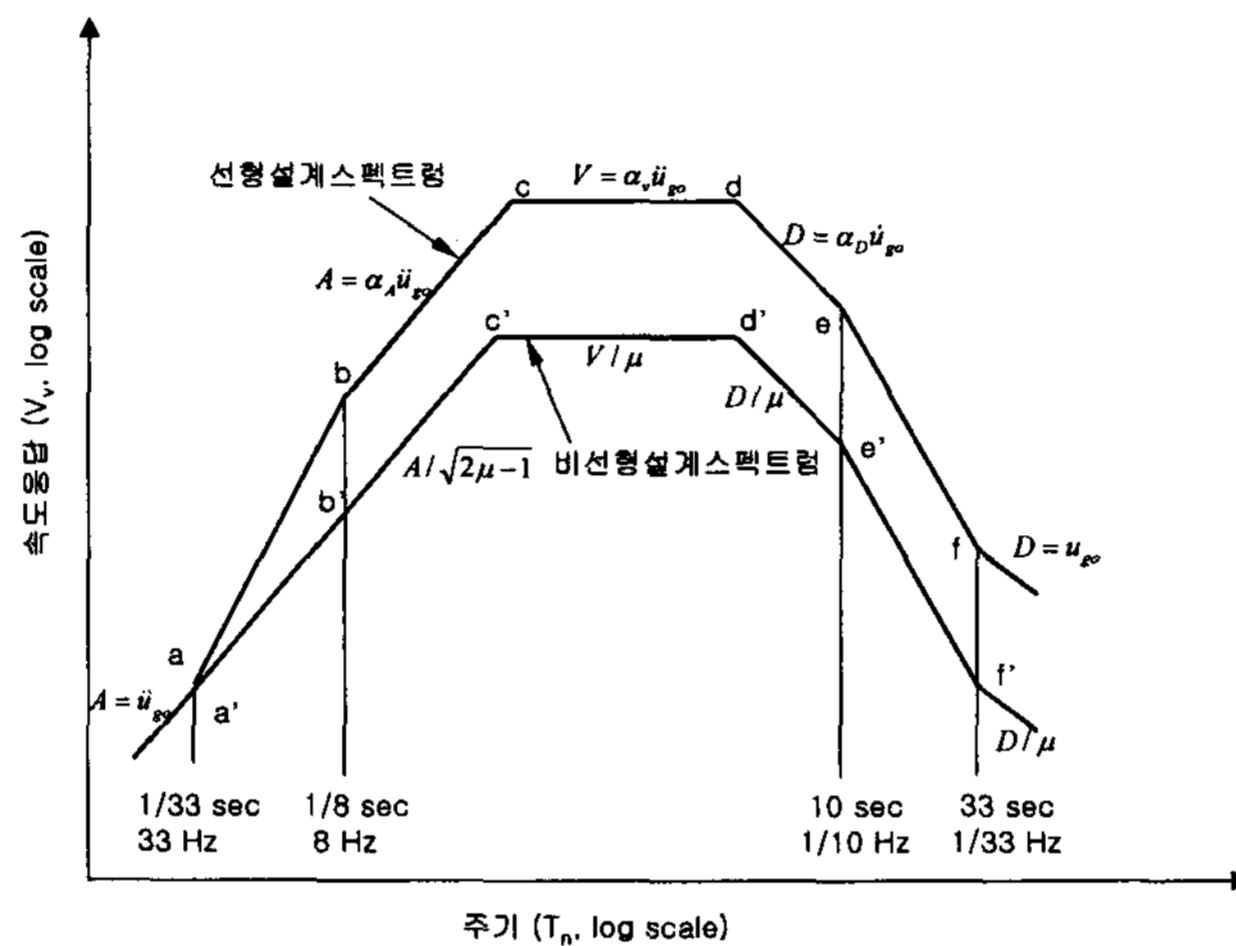


그림 1 Newmark-Hall이 제시한 방법에 따른 비선형응답스펙트럼의 작성

### 2.3 시간이력해석법

시간이력해석법은 가장 정밀한 해석방법으로서 지진이 가해지는 구조물을 비선형구조시스템으로 이상화 시키고 이에 대한 비선형 운동방정식을 유도한 다음, 지진하중  $f(t)$ 가 작용할 때의 구조물의 거동을 시간증분운동방정식을 사용하여 수치해석적으로 적분한다. 시간이력해석법에는 직접적분법과 또한 모드의 직교성을 이용하는 모드중첩법이 있다. 모드중첩법은 선형구조물에만 적용할 수 있으나 직접적분법은 비선형 구조물에도 적용할 수 있고 모드중첩법과는 달리 고유치문제를 풀 필요가 없는 장점이 있다. 그러나 감쇠력을 모형화하는데 모드중첩법에서는 감쇠비만으로 간단히 해결할 수 있으나 직접적분법에서는 보다 복잡한 과정으로 감쇠를 규정하여야 한다.

## 3. 응답스펙트럼해석법

### 3.1 일정변위연성법

일정변위연성스펙트럼은 변위를 목표연성비에 의한 값으로 제한하기 위하여 단자유도계의 비선형

저항강도를 주기별로 도식화하여 나타낸 것이다. 이러한 형태의 스펙트럼은 강도요구스펙트럼이라고도 한다.

$$\ddot{\mu}(t) + 2\omega\xi\dot{\mu}(t) + \omega^2\frac{F(t)}{F_y} = -\frac{\omega^2}{\eta} \frac{\ddot{u}_g(t)}{\max|\ddot{u}_g|} \quad (1)$$

$$\mu(t) = \frac{u(t)}{u_y} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{F_y}{m \max|\ddot{u}_g|} \quad (3)$$

여기서,  $\mu(t)$ : 변위연성비,  
 $\eta$ : 무차원강도

일정변위연성스펙트럼은 무차원강도를 식 (1)의 목표연성비가 일정한 허용오차(일반적으로 1% 이내) 내에 들어오도록 반복 계산하여 구한다.<sup>(8)</sup>

### 3.2 일정손상법

구조물의 비선형응답을 평가하는데 있어서 변위연성은 구조물의 비탄성반복변형에 민감하지 않기 때문에 다른 신뢰할 수 있는 인자를 함께 고려해주어야 한다. 즉, 구조물에 흡수되는 이력에너지와 누적연성비와 같은 인자들이 변위연성비와 함께 고려되어야 한다. 이러한 인자들을 고려할 수 있는 손상모델로 Park-Ang 모델<sup>(9)</sup>을 사용하였는데, 그 이유는 모델이 간단하고 철근콘크리트시편과 강재 시험체 두 가지 모두에 대하여 많은 실험과 경험을 토대로 한 결과가 검증되어 있기 때문이다.

Park-Ang 모델에 따르면 지진손상은 반복응답에 따른 최대비선형변형과 누적손상의 선형중첩으로 나타낼 수 있다. 총 손상은 손상지수 “DI”를 사용하여 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{E_h}{F_y \delta_u} \quad (4)$$

여기서,  $\delta_m$ : 지진하중에 의한 시스템의 최대변형

$\delta_u$ : 단조증가하는 하중을 받는 시스템의 극한변형

$F_y$ : 시스템의 항복강도

$E_h$ : 시스템에 흡수되는 이력에너지

$\beta$ : 경험적 상수 (-0.3~1.2, 평균값 0.15를 사용)

식 (4)의 우측 첫 번째 항이 최대비탄성변형에 의한 손상을 나타내며, 두 번째 항이 누적손상을 나타낸다.

### 3.3 응답스펙트럼의 비교 분석

이 절에서는 위의 두 가지 방법에 의하여 작성된 비선형응답스펙트럼을 비교, 분석하였다. 이를 위한 입력지진으로서는 연약지반 기록지진, 암반지반 기록지진 및 건설교통부의 내진설계연구(II)<sup>(10)</sup>의 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 인공지진을 사용하였다. 지진기록은 National Geophysical Data Center<sup>(11)</sup>로부터 수집하였다. 여기서 암반지반에 비해 연약지반의 지진기록이 진앙지와의 거리가 긴 반면에 지반최대가속도가 크며, 명확한 탁월주기( $T_d$ )를 갖는 협폭무작위운동(narrowband random motion)이다. 이것은 연약지반의 경우 지반주기에 따라 지진운동을 증폭시키는 효과가 크기 때문인 것으로 판단된다. 계산된 각 스펙트럼은 그림 2에 나타내었다.

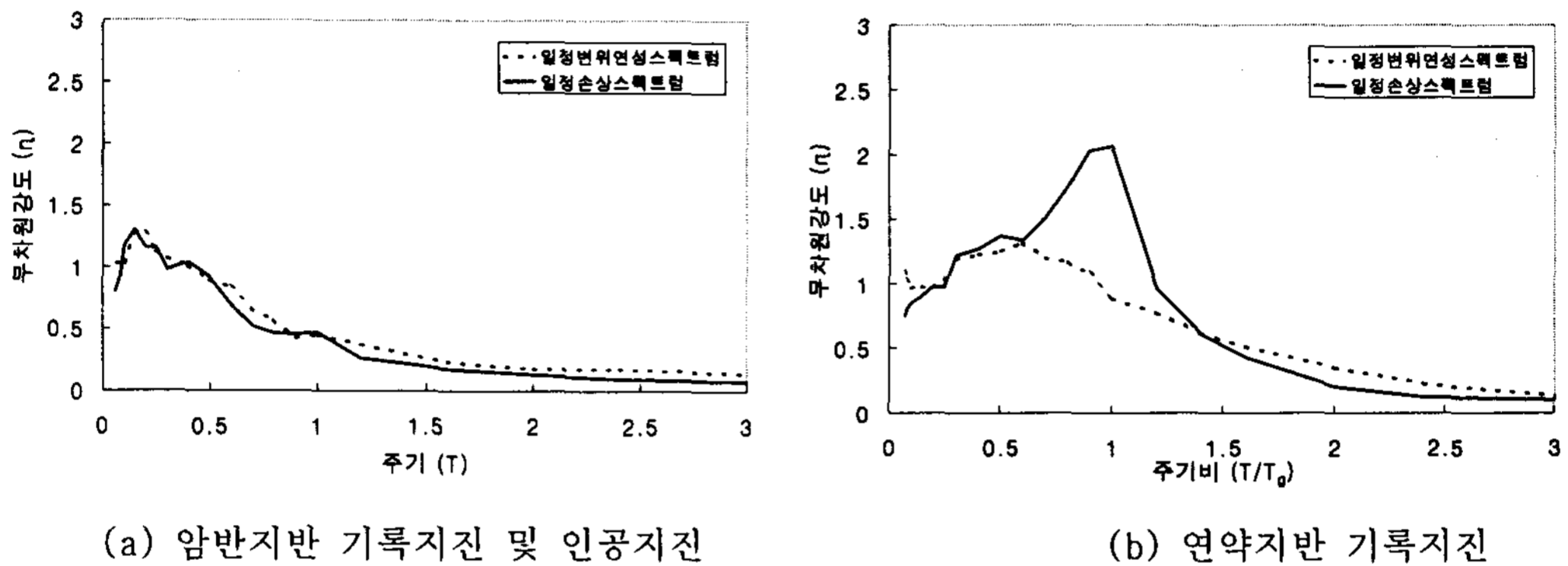


그림 2 일정변위연성스펙트럼과 일정손상스펙트럼의 비교 (변위연성비 2, 감쇠비 5%)

여기서 암반지반 기록지진과 인공지진의 경우 두 방법에 의한 스펙트럼이 유사한 형태를 보이고 있다. 반면에 연약지반 지진기록에 의한 일정손상스펙트럼은 주기비 1 근처에서 두 방법간에 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 것처럼 주기비 1부근에서는 누적손상이 크기 때문이다.

앞서 설명한 것과 같이 종래의 설계방법은 연약지반에 대한 설계방법으로는 부적합한 것이 증명됐다. 그 이유는 변위연성비로는 표현할 수 없는 누적손상이 매우 커지기 때문이다. 이러한 부분을 보완할 수 있는 일정손상스펙트럼을 작성하여 구조물의 내진해석을 해야 할 필요가 있다.

## 4. 적용성 평가를 위한 예제해석

### 4.1 일반사항

구조물의 동적해석방법인 응답스펙트럼해석법에 대한 개선점을 제안하고자 앞서 일정변위연성스펙트럼과 일정손상스펙트럼의 특성을 파악하고 도로교내진설계기준에서 제시한 설계지진에 부합되는 인공지진 및 암반지반과 연약지반에서 얻어진 기록지진을 사용하여 응답스펙트럼을 작성하였다. 이 결과로 얻어진 각각의 응답스펙트럼을 설계스펙트럼으로 교량 구조물에 적용시키고 그 결과를 비교함으로써 적용성을 평가하였다.

또한 현행 도로교시방서에서 제시하고 있는 개략적인 비선형응답해석방법인 응답수정계수법과

정밀해석인 비선형시간이력해석을 통해서 세 가지 방법의 값을 비교하였다. 비선형시간이력해석방법에 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 3차원 동적비선형해석 프로그램인 DRAIN-3DX<sup>(12)</sup>를 사용하였고 선형해석에 대한 검증을 위해 범용프로그램 SAP2000<sup>(13)</sup>을 사용하였다.

#### 4.2 해석모델

해석에 사용된 교량모델은 3경간연속 PSC거더교이고 교각의 형태는 단주(1-column)와 3기둥가구(3-column bent)의 2가지 형태로 나누어 각 교각에 대해서 해석하였다. 전체교량에 대한 해석모델은 그림 3에 나타내었다. 여기서 교각과 상부구조의 모델은 도로교설계기준의 제안사항에 따라 상부구조는 지간의 1/4지점마다 절점을 모델링하였으며 교각은 1/3지점마다 절점을 모델링하였다.

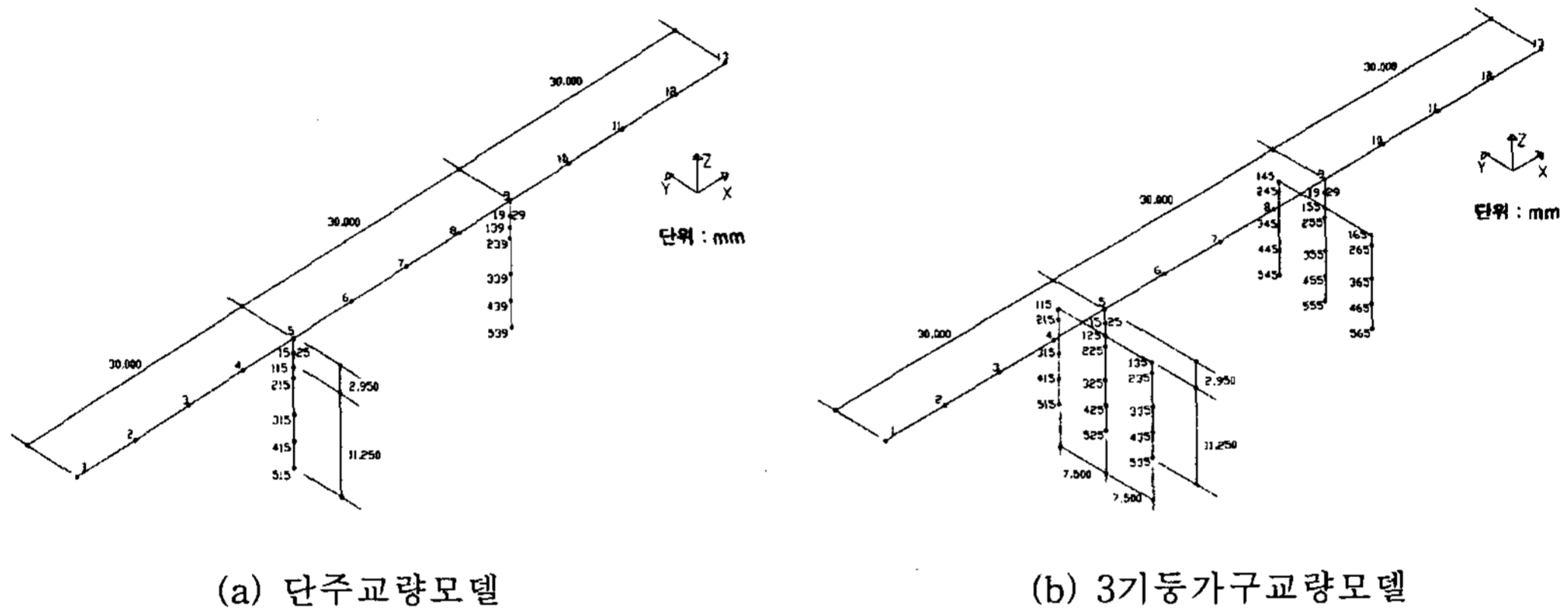
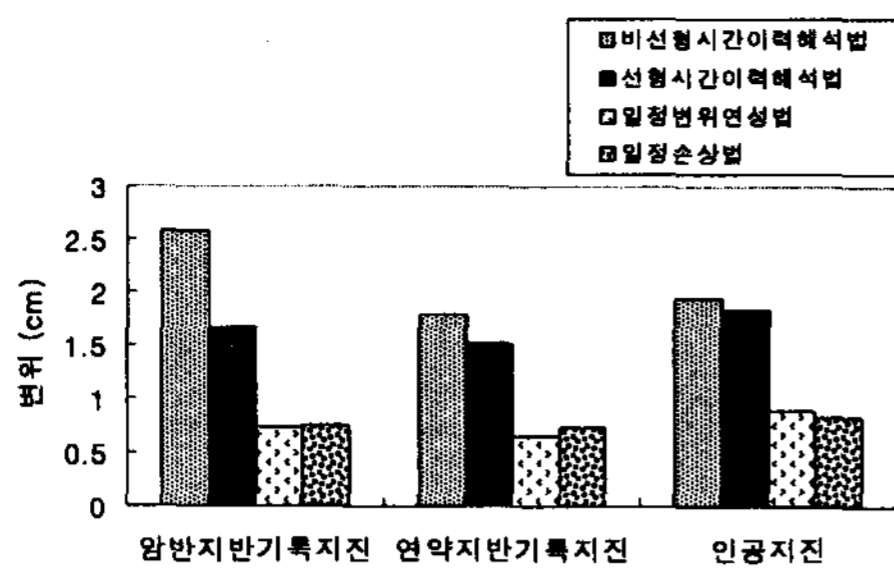


그림 3 해석교량의 전체교량모델그림

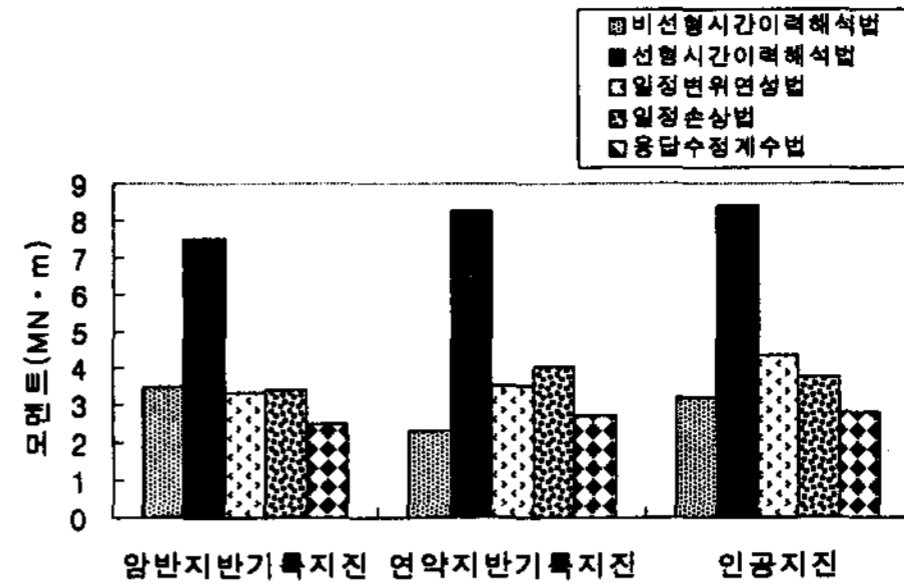
#### 4.3 해석 결과 및 분석

##### 4.3.1 해석방법별 결과비교

해석방법별 결과비교를 위해 비선형시간이력해석, 선형시간이력해석, 비선형응답스펙트럼해석 및 응답수정계수법을 사용한 해석결과를 그래프로 나타내었다. 해석치는 교각에 발생하는 최대모멘트와 교각상단의 변위를 계산하여 그림 4와 그림 5에 나타내었다.



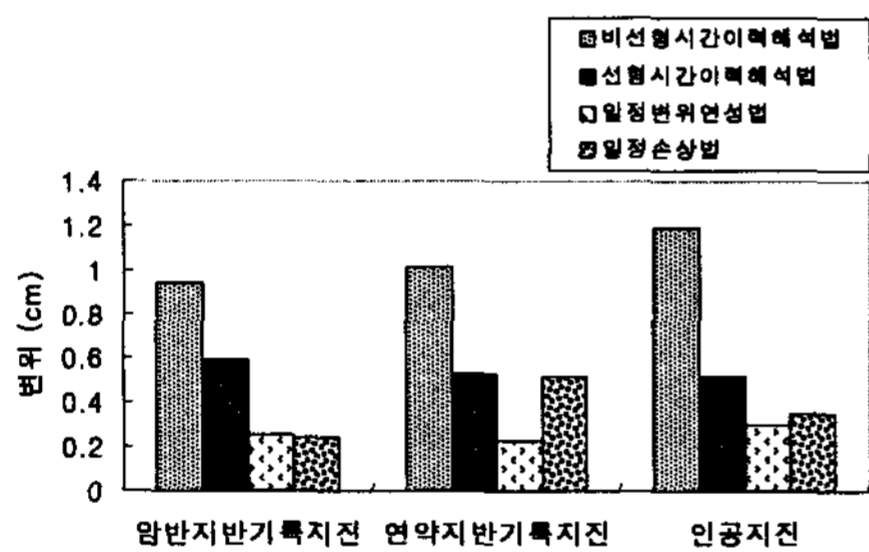
(a) 교각상단변위



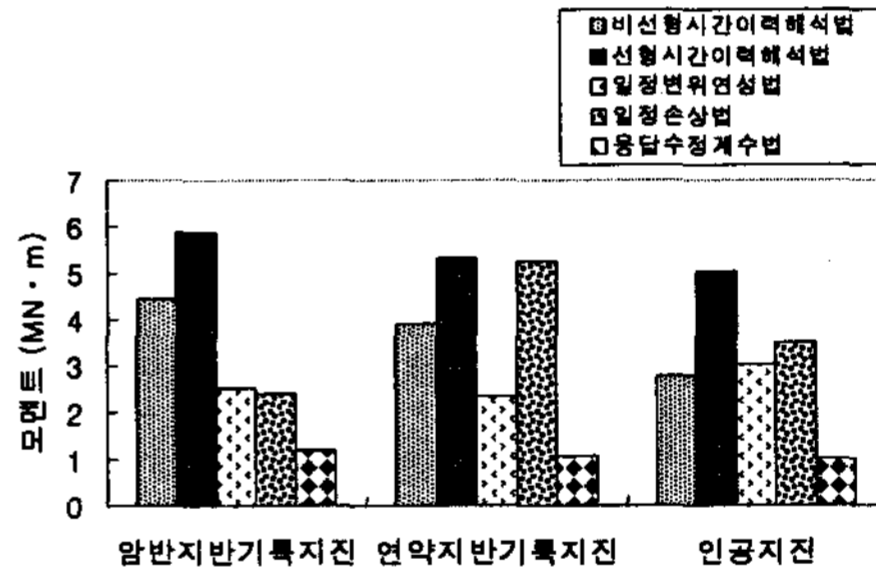
(b) 교각하단모멘트

그림 4 단주교량의 해석방법별 결과비교 (0.154g)

단주 교량의 각 방법별 해석결과 교각 상단의 비선형변위가 선형해석결과에 비해 크므로 교량모델의 비선형성이 큰 것을 알 수 있다. 한편, 비선형응답스펙트럼해석법에 의한 변위는 시간이력해석결과 보다 작은 값을 보여 비선형응답스펙트럼해석법은 변위해석에 적절하지 않음을 보여준다. 또 교각에 발생하는 최대모멘트의 경우, 선형해석결과가 비선형해석결과에 비교하여 월등히 큰 값을 가지므로 비선형해석으로서는 비경제적인 설계가 될 수 있음을 보여준다.



(a) 교각상단변위



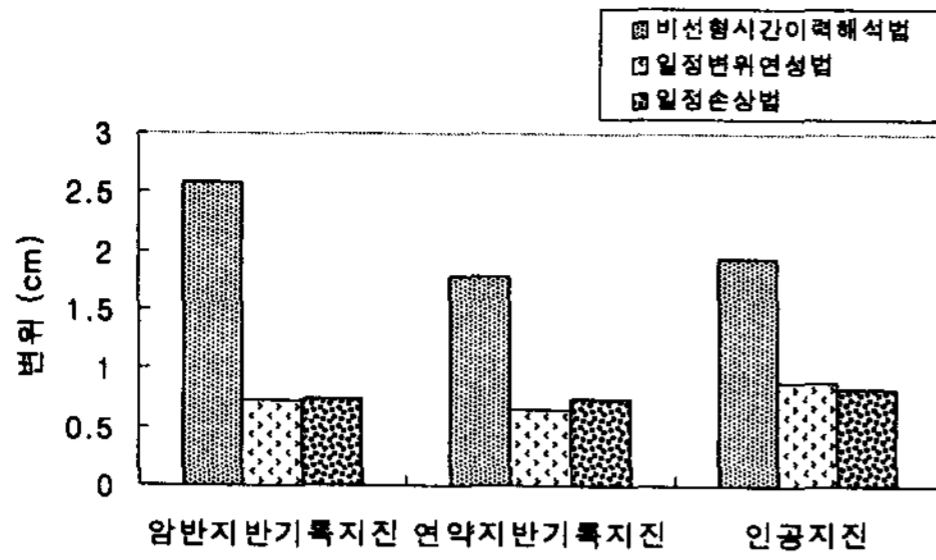
(b) 교각상단모멘트

그림 5 3기둥 가구 교각 교량의 해석방법별 결과비교 (0.154g)

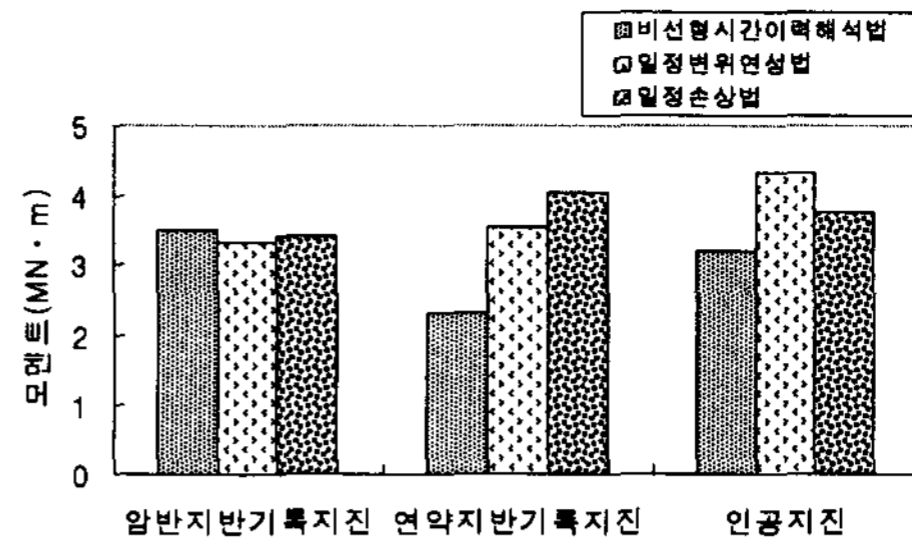
3기둥 가구교량의 각 방법의 해석결과, 그 정도의 차이는 있지만 단주교각교량과 유사한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 지진력 응답의 경우, 응답수정계수법에 의한 결과는 비선형 해석결과와 비교하여 매우 작은 값을 나타낸다. 따라서, 도로교설계기준의 응답수정계수법이 비안전측 결과를 줄 수 있으며 이러한 경향은 단주보다 다주교각교량의 경우 그 정도가 심함을 알 수 있다.

#### 4.3.2 비선형응답스펙트럼해석 결과비교

비선형응답스펙트럼해석법의 해석결과는 변위연성비 2에 대한 일정변위연성스펙트럼과 일정손상스펙트럼의 해석결과를 엄밀해인 비선형 시간이력해석결과와 비교하여 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

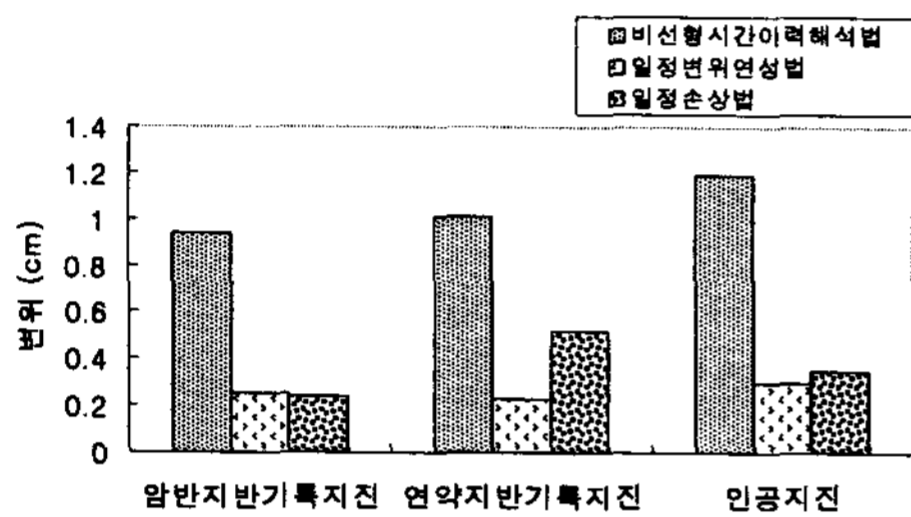


(a) 교각상단변위

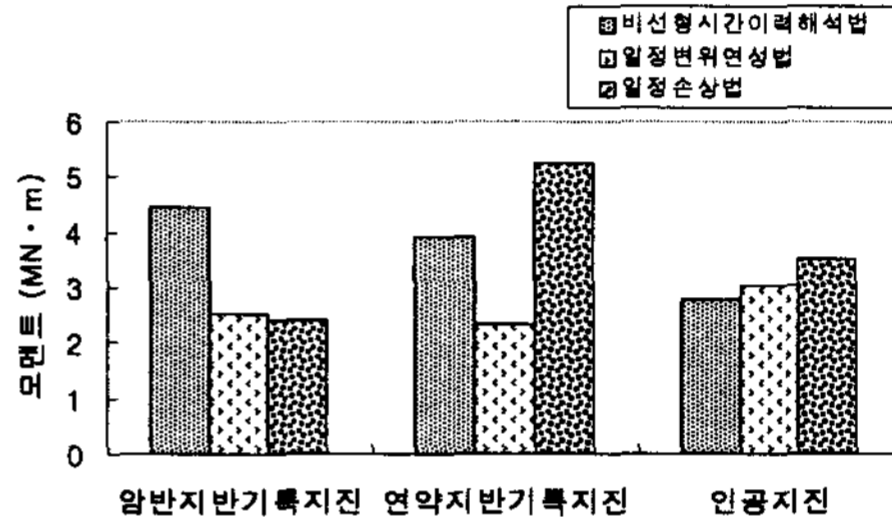


(b) 교각하단모멘트

그림 6 단주교량의 비선형응답스펙트럼해석결과 비교 (0.154g)



(a) 교각상단변위



(b) 교각하단모멘트

그림 7 3기둥 가구 교량의 비선형응답스펙트럼해석결과 비교 (0.154g)

해석결과 변위는 두 방법이 모두 시간이력해석결과와 큰 차이를 보이고 있다. 따라서, 응답스펙트럼해석법에 의하여 계산된 변위는 실제 값보다 작다는 것을 유념할 필요가 있다. 한편, 해석결과에 의한 응답모멘트의 경우는 일정손상법이 일정변위연성법에 비하여 좀더 합리적이고 실제에 가까운 응답을 주고 있음을 알 수 있다. 또 암반지반보다는 연약지반의 기록지진의 경우 이상과 같은 경향이 크다는 사실도 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 연약지반의 탁월주기에 의해 연약지반상의 구조물이 더 큰 영향을 받는 수 있다는 것을 보여주는 결과이다.

## 5. 결론

이 논문에서는 비선형 시간이력해석, 비선형응답스펙트럼 해석 및 개략적인 방법인 응답수정계수법을 사용하여 교량 구조물의 동적비선형 응답을 계산하였다. 특히 비선형응답스펙트럼 해석시에는 종래의 일정변위연성에 대한 해석과 함께 새롭게 제시된 일정손상스펙트럼에 대한 해석을 동시에 수행한 후 그 결과를 비교함으로써 일정손상스펙트럼해석법의 적용성을 검토하였다. 이러한 연구결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



- (1) 기존의 일정변위연성법은 인공지진과 암반지반 기록지진에 대해서는 비교적 실용적인 비선형 동적해석결과를 줄 수 있는 반면에, 연약지반 기록지진에 대해서는 비안전측의 결과를 줄 수 있다. 그 이유는 지반의 특성으로 인해 지진성분이 협폭무작위운동이 되므로 이로 인한 큰 누적손상이 발생될 수 있기 때문이다.
- (2) 교량의 비선형해석법에 의한 해석결과 현재 도로교설계기준에서 제시한 응답수정계수는 단주교량인 경우에 근사한 결과를 줄 수 있으나 다주교량인 경우에는 응답수정계수가 과다하게 설정되어있어 비안전측 설계가 될 수 있다.
- (3) 이 연구의 결과는 제한된 예제해석의 결과이므로 보편화된 일반적인 결론을 얻기 위해서는 다양한 모델 및 폭넓은 연성비를 사용하여 추가적인 연구가 필요하다.

### 감사의 글

이 연구는 인천대학교 교내 특별과제 지원 연구결과의 일부이며, 저자 일동은 그 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Miranda, E., 1993 "Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra", ASCE, Journal of Structural Engineering, 119(%), 1319-1338.
2. Pennung, W., and Phaiboon, P., "Constant Damage Spectra", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 3, No. 3, 1999, pp 329~347.
3. International Conference of Building Officials, Uniform Building Code, UBC, 1997.
4. Applied Technology Council, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulation for Buildings, Report No. ATC-3-06, 1978.
5. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1992.
6. 건설교통부, 도로교설계기준, 내진설계편, 2000.
7. Chopra, A. K., 1995 "Dynamics of Structures", Prantice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
8. Mahin, S. A., and Lin, J., 1983, "Construction of inelastic response spectra single dgree of freedom system.", Report No. UCB/EERC-83/17, Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California Berkeley, Calif.
9. Park, Y. J. and Ang, A. H. S. "Mechanistic Seismic Damage model for reinforced Concrete", ASCE, journal of structural engineering. 111(4), 722-739, 1985.
10. 건설교통부, 내진설계연구(II), 1997. 12.
11. Dunbar, p. and Row,. L. W., "An Earthquake Strong-Motion data Catalog for Personal Computers", National Geophysical Data Center, NOAA, 1996.
12. Prakash, V., Powell, G. H., and Campbell, S., DRAIN-3DX Base Program Description and User Guide, U. C. Berkeley, 1994.
13. Computers & Structures, SAP2000 Analysis Resference, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, 1996.