

원본 지반운동 시간이력에 따른 스펙트럼 부합 시간이력의 특성

Characteristics of Spectral Matched Ground Motions Time Histories According to Seed Ground Motion Selection

최다술¹⁾ · 지혜연¹⁾ · 김정환^{2)*}

Choi, Da Seul¹⁾ · Ji, Hae Yeon¹⁾ · Kim, Jung Han^{2)*}

¹⁾부산대학교 토목공학과 석사과정, ²⁾부산대학교 토목공학과 조교수

¹⁾Master Course, Department of Civil Engineering, Pusan National University, ²⁾Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University

/ A B S T R A C T /

According to several seismic design standards, a ground motion time history should be selected similar to the design response spectrum, or a ground motion time history should be modified by matching procedure to the design response spectrum through the time-domain method. For the response spectrum matching procedure, appropriate seed ground motions need to be selected to maintain recorded earthquake accelerogram characteristics. However, there are no specific criteria for selecting the seed ground motions for applying this methodology. In this study, the characteristics of ground motion time histories between seed motions and spectral matched motions were compared. Intensity measures used in the design were compared, and their change by spectral matching procedure was quantified. In addition, the seed ground motion sets were determined according to the response spectrum shape, and these sets analyzed the response of nonlinear and equivalent linear single degrees of freedom systems to present the seed motion selection conditions for spectral matching. As a result, several considerations for applying the time domain spectral matching method were presented.

Key words: Design response spectrum, Spectral matching, Single degree of freedom system, Nonlinear response, Equivalent linear response, Energy dissipation

1. 서론

내진설계를 위한 응답이력 해석을 수행하는 경우 지반운동의 시간이력이 필요하며, 이는 설계응답스펙트럼에 부합해야 한다. 국내 내진설계 일반(KDS 17 10 00)[1]에 따르면 실 지진기록은 국내여건과 유사한 판내부(intra-plate) 지역에서 계속된 기록을 사용하며 원본파형을 수정할 경우 스펙트럼 부합 과정 시 파형의 변형을 최소화하도록 한다. 국외 기준서 중 AASHTO[2]는 계속된 시간이력 사용 시, 설계응답스펙트럼의 특정 주기 영역에 가깝게 배율조정하도록 하며, 개발된 시간이력을 사용할 때에는 시간이력이 부지의 지진환경 특성을 가지고 각 시간이력은 시간영역(time-domain) 방법에서 설계응답스펙트럼과 부합하게 변환되도록 규정하고 있

다. 이러한 시간이력 작성기준은 일반적으로 원자력시설 기준에서 먼저 제시되고 유사한 기준이 일반시설에 대해서 적용되어왔다. 국외 원자력 기준인 ASCE 4-16[3] 및 ASCE 43-05[4]에서는 목표스펙트럼에 맞춘 수정된 기록이나 계속된 지진기록을 사용하도록 한다. NUREG-0800[5]에서는 관심주기 범위 내에 부합한 인공지진 또는 실 지진기록을 선택하도록 한다. 이를 국내에 적용하기 위해서는 계속지진파를 사용하여 지진해석을 수행해야 하지만, 설계응답스펙트럼과 일치하는 국내 지진 계속기록을 얻기 힘들기 때문에 시간이력의 변형을 통해서 설계응답스펙트럼에 맞도록 변형하여 사용하고 있다. 설계응답스펙트럼에 부합한 시간이력 생성 및 변형 기준에 따르면 스펙트럼 부합에서 실 지진기록 선택은 보통암 지반에서 계속된 지진기록 및 고려하는 설계지진과 유사한 규모의 기록을 선정하도록 하는 등 정성적 기준을 제시하거나 또는 목표응답스펙트럼의 형상과 유사한 응답스펙트럼의 실 지진기록을 선택하도록 제안하고 있다[1, 6]. 하지만 설계응답스펙트럼과 유사한 시간이력을 선택하라는 것 외의 응답스펙트럼 형상에 관한 명확한 기준이 없기 때문에 설계응답스펙트럼 부합 변형을 위

*Corresponding author: Kim, Jung Han

E-mail: jhankim@pusan.ac.kr

(Received September 29, 2020; Revised December 1, 2020; Accepted December 7, 2020)

한 계측기록 선택에 어려움이 있다. 스펙트럼부합을 위한 실 시간이력 선택에 관한 기존 연구에서는 목표스펙트럼과 계측된 시간이력의 스펙트럼가 속도와의 상대적 오차에 기초하여 기록을 선정하였다[7]. 그러나 우리나라와 같이 지진기록이 많지 않은 경우 목표스펙트럼에 가까운 시간이력을 선택하는 것이 쉽지 않다. 따라서 스펙트럼에 차이가 있더라도 원본 실 시간이력으로 선택해야 할 부득이한 경우가 있으며 이때 추가적인 고려사항에 대해서 기준이 필요하다. 이 연구에서는 한정된 계측기록 중 어떠한 형상의 응답스펙트럼 및 시간이력을 선택하는 것이 타당한가에 대해 제안하기 위해 응답스펙트럼 형상에 따라 지진파를 세트별로 구분하고 시간영역 변형 방법 기반의 프로그램을 활용하여 설계응답스펙트럼에 부합한 시간이력을 생성하였다.

시간영역 스펙트럼 부합 변형의 목적은 변형된 지진파에 의한 구조물의 응답 특성이 원본 시간이력에 의한 응답특성을 최대한 유지시키기 위한 것이다. 따라서 실 지진 계측기록 및 변형된 시간이력의 거동을 비교하기 위해 등가점성감쇠를 이용한 선형해석과, 비선형 단자유도 해석을 단자유도 구조물에 대해서 수행하였다. 이를 활용하여 응답 결과 분석을 통해 시간이력 부합 시 어떤 응답스펙트럼의 형상을 가지는 지진파를 선택하는 것이 타당한지 제안하고자 한다.

2. 시간이력 생성

2.1 계측기록 이용 시간이력 생성방법

계측기록을 이용하여 목표응답스펙트럼과 일치하는 시간이력을 생성하기 위해 배율조정, 주파수영역(frequency-domain) 변형, 시간영역(time-domain) 변형의 세 가지 방법이 사용된다.

배율조정은 시간이력에 일정 계수를 곱하여 목표스펙트럼의 관심주기가 일치하도록 응답스펙트럼의 크기를 조정하는 방법이다. 주파수영역 변형은 기준에 많이 사용되던 스펙트럼 부합 방법이며 원본 시간이력의 푸리에 위상을 유지하면서 목표응답스펙트럼과 응답스펙트럼의 비율을 기반으로 푸리에 진폭스펙트럼을 수정한다. 시간영역 변형은 원본 시간이력에 조정파형을 추가하여 목표스펙트럼과 일치하도록 시간이력을 수정하는 방법이다. 주파수영역 변형은 시간이력의 비정상적인(non-stationary) 특성 등 원본 지진파에서 나타나는 다양한 지진파의 특성을 반영하지 못하기에 최근에는 권장되지 않는다. 배율조정은 목표주기 외에는 설계응답스펙트럼과의 차이를 보이므로 구조물의 항복 등 비선형 거동으로 인해 유효주기가 목표주기를 크게 벗어나거나 탄성거동이라고 하더라도 고차모드가 목표주기를 벗어나는 경우 응답의 차이가 생기게 된다. 이에 반해 시간영역 변형은 스펙트럼 부합 변형을 통해 관심주기에 대해 목표응답스펙트럼에 부합하도록 하고 비정상적인 특성 또한 어느 정도 유지할 수가 있기 때문에 스펙트럼 부합 방법 중 시간이력 변형 방법이 주목받고 있다[8-11].

2.2 국·내외 시간이력 생성 기준

국·내외 여러 기준서에 설계스펙트럼과 일치하는 스펙트럼 생성에 관한 내용이 기술되어 있다. 국외 기준서에 따르면 ASCE 43-05[4]는 비선형

해석의 경우 계측된 지진파 또는 목표스펙트럼에 맞게 변형시킨 지진파만을 사용할 수 있도록 규정되어 있다. ASCE 4-16[3]에서 실 지진기록의 스펙트럼 형태는 분석할 진동수 범위에 걸쳐 설계 목표스펙트럼의 형태와 상당히 일치하도록 하나 이상의 지반운동을 선택해야 하며 시간이력은 부지에서 예상되는 입력운동을 합리적으로 나타내는 특성을 가져야 한다. ASCE 7-16[12]에서는 변형된 지반운동의 응답스펙트럼이 목표스펙트럼과 유사하도록 지반운동에 추가적인 파형을 더하거나 빼는 경우가 있으며 스펙트럼 부합의 여부와 관계없이 배율조정이 필요하다고 기술되어 있다. AASHTO [2]는 개발된 시간이력은 부지의 지진환경 특성을 가져야 하며, 시간이력의 변형을 최소화하기 위해서는 스펙트럼 부합 전 설계응답스펙트럼과 특정 주기의 영역에 가깝게 배율조정 되어야 한다고 기술되어 있다. 또한 각 시간이력은 시간영역 변형에서 설계응답스펙트럼과 부합하게 수행되어야 한다. NUREG-0800[5]에서는 실 지진기록을 선택할 시, 관심주기 범위에서 설계응답스펙트럼과 유사한 지진기록을 선택해야 하며 비선형 구조 해석의 경우, 관심주기 범위 내에 부합한 인공지진 또는 실 지진기록을 선택해야 한다.

국내 기준서 KEPIC STB[13]에 따르면 시간이력해석을 위해 실 지진 운동을 수정하거나 인공적으로 합성된 지반운동을 사용할 수 있다. 국내 내진설계 기준(KDS 17 10 00)[1]에서 실 지진기록을 활용하여 지반운동 시간이력을 생성할 시 하부지반이 S₁ 지반(암반 지반) 혹은 이에 준하는 보통 암 지반에서 계측된 지진기록이어야 하며, 고려하는 설계지진과 유사한 규모의 기록을 선정하여야 한다. 선정된 지진기록은 S₁ 지반의 수평설계지반 운동의 표준설계응답스펙트럼에 맞추어 수정 적용하며, 수정 시 원본파형의 왜곡을 최소화하기 위해 기존파형의 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼에 맞추어 보정할 수 있다. 이때 설계 대상구조물의 탁월주기를 주 대상으로 보정한다.

위의 기준을 통해서 내진설계 시 필요한 시간이력은 배율조정 및 스펙트럼 부합으로 생성하여 사용할 수 있으며, 스펙트럼 부합을 위한 실 지진기록 선택 시에는 부지의 지진환경 특성을 가져야 하여 목표응답스펙트럼과 유사한 형태여야 함을 알 수 있다.

2.3 원본 시간이력의 시간영역 스펙트럼 부합 방법

실 시간이력에 조정파형을 추가하여 시간이력을 수정하는 시간영역 변형이 Kaul[14]에 의해 제안되었으며, 단일 감쇠 대상 스펙트럼 부합 이후 Lilhanand and Tseng[10]에 의해 다중 감쇠 및 목표스펙트럼과 일치하는 스펙트럼 부합을 위한 알고리즘 및 Lilhanand and Tseng 함수가 개발되었다. 이에 따라 Lilhanand and Tseng의 알고리즘을 구현하고 실 시간이력의 비정상적인 특성을 보존하는 RSPMatch 프로그램과 Tapered Cosine 함수가 Abrahamson[15]에 의해 개발되었다. Lilhanand and Tseng에서 제시된 Impulse 함수에 보정계수를 적용하여 시간영역에서 응답스펙트럼의 주기별 차이에 따라 적절한 조정파형을 추가함으로써 목표스펙트럼에 맞도록 보정하는 방식이 연구되었다[16]. Hancock[9]에 따라 Tapered Cosine 조정파형을 수정하여 기준선보정(baseline correction)이 필요 없는 RSPMatch 프로그램의 수정이 이루어졌다. 또한 Hancock과 Abrahamson 중 하나의 알고리즘 및 파형을 선택하여 스펙트럼 부합을 실행할 수 있는

SesimoMatch 프로그램이 개발되었다[17]. Lilhand and Tseng 파형과 Tapered Cosine 파형의 장점을 활용하여 두 가지 파형을 모두 이용해 시간 이력을 수정하여 응답스펙트럼에 부합한 시간이력을 생성하는 연구도 시행되었다[18]. 실 시간이력을 특정주파수에 대하여 목표스펙트럼에 맞추도록 시간이력을 증폭시킨 후 목표스펙트럼의 주파수별로 네 단계로 나누어 순차적으로 응답스펙트럼을 스펙트럼 부합시킨 연구도 진행되었다[19]. 또는 스펙트럼 보정단계를 여러 절차로 나누어 응답에 있어 큰 변화를 나타내는 구간을 세분화하여 보다 목표스펙트럼과 일치하게 스펙트럼 부합으로 시간이력을 생성하였다[20]. 다주기 스펙트럼 부합에서 종종 발생하는 수치적 발산의 문제를 해결하기 위해 스펙트럼 부합을 위한 알고리즘을 수정하여 단일 주기에서의 스펙트럼 부합으로 효율성을 갖도록 하였다[21].

스펙트럼 부합을 위한 실 계측 지진과 선택에 관한 이전 연구에서는 유사-스펙트럼가속도(Pseudo Spectral Acceleration, PSA), 유사-스펙트럼 속도(Pseudo Spectral Velocity, PSV), 스펙트럼변위(Spectral Displacement, SD)에 대한 상대적 오차에 기초하여 실 지진기록을 선택하거나 목표스펙트럼의 크기, 거리 등의 조건부평균스펙트럼(Conditional Mean Spectra, CMS)을 사용하여 실 지진기록을 선택하였다[7, 22]. 또한 특정 대상 부지를 대상으로 하지 않고 일반적인 설계스펙트럼을 대상으로 스펙트럼부합을 시행할 경우, 다양한 조건을 포함하는 실 지진기록을 선택하였다[19].

이러한 연구의 대부분은 스펙트럼 부합 절차를 효율화 하는 것에 중점을 두거나 실 지진기록의 선택 조건에 대한 것이다. 그러나 이를 구조물의 비선형 응답 특성 관점에서 분석하거나 실 지진기록이 충분치 않은 경우 필요한 고려사항에 대해서는 제시하지 않았다.

3. 원본 시간이력 세트 결정 및 스펙트럼 부합 변형

이 연구에서는 원본 시간이력을 어떻게 선택하는지에 따라 시간영역 스펙트럼 부합 과정을 거쳐 변형된 시간이력이 어떠한 특성을 가지는가에 대해 분석하였다. 따라서 실 계측 지진과 선택 및 변형을 통해 변형 전, 후의 구조물 응답특성을 분석하여 비교하였다. 이를 위한 시간영역 시간이력 변형은 다음과 같이 수행하였다.

3.1 목표스펙트럼 및 관심주기

목표응답스펙트럼은 우리나라 표준설계응답스펙트럼에서의 암반지반(S1 지반)의 스펙트럼 형상을 적용하였다. 유효수평지반운동 가속도는 지진구역 I(지반구역계수, $Z=0.11$ g), 평균재현주기 1,000년(위험도계수 1.4)을 적용하여 $0.14 \times 0.11 = 0.154$ g로 설정하였으며 응답스펙트럼의 형상은 Fig. 1과 같다[1]. 이 연구에서 예제로 설정한 탄성구조물은 일반적인 10층 건물의 고유주기와 유사도록 주기 1초로 가정하였다. 일반적으로 시간영역 스펙트럼 부합 방법은 비선형 구조물 해석 시 특히 권장된다[12]. 이에 따라 비탄성영역까지 변형하는 구조물의 응답이 중요하기 때문에 국내 건축물 내진설계 기준(KDS 41 17 00)에 따라 가장 큰 반응수정계수 8을 가지는 구조시스템을 가정하여 구조물의 보유 연성도는 8로 가정하였다[23]. 주기 1초 구조물의 비선형 해석 시, 항복으로 인해 유효주기가 1초 이

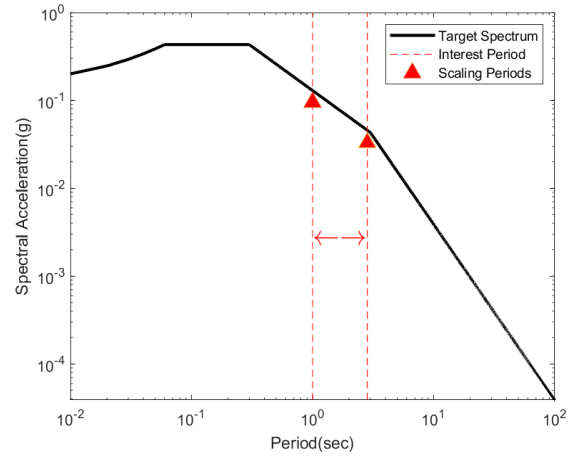


Fig. 1. S1 site, 1,000 year return period standard design response spectrum and interest period in this study

상의 장주기로 변하는 것을 고려하도록 하였다[24]. 이에 따라 연성도 8에서의 유효주기는 2.83초이므로 주기 1초와 주기 2.83초 사이를 관심주기(interest period)로 설정하였으며 이는 Fig. 1과 같다.

3.2 시간이력 배율조정 계수

일반적으로 원본 지진의 응답스펙트럼과 목표응답스펙트럼은 항상뿐 만 아니라 지진세기에서도 차이가 클 수 있다. 따라서 이를 보정하기 위해 배율조정을 통해 특정 주기에 응답스펙트럼을 맞춘 후 스펙트럼 부합 변형을 수행한다. 이때 배율조정을 위한 주기를 선택 시 구조물의 탄성 고유주기나 비선형 거동이 예상되는 경우는 유효주기를 선택할 수 있다. 이 연구에서는 두 가지를 모두 비교해 보았다. 우선 배율조정 계수는 주기 1초에서의 목표응답스펙트럼과 응답스펙트럼의 비로 설정하였다. 또한 비선형 해석을 위한 구조물의 보유 연성도 8에서의 유효주기인 주기 2.83초에서의 목표응답스펙트럼과 응답스펙트럼의 비를 배율조정 계수로 설정하였으며 Fig. 1의 배율조정주기(scaling period)와 같다. 따라서 원본 지진기록에 배율조정 계수를 곱한 후 스펙트럼 부합을 시행하였다.

3.3 시간이력 세트 결정

PEER의 NGA Database에서 지반운동 시간이력을 선택하였다[25]. 실 지진기록 선택 시, 대상 스펙트럼의 지반 특성에 맞는 지진을 선택해야 하지만 이 연구에서는 지반 특성까지 고려하지는 않으므로 실 시간이력의 응답스펙트럼 형상과 목표응답스펙트럼을 바탕으로 한 세트 당 10개의 실 지진기록으로 구성된 총 세 개의 세트(BE, UND, OV)를 설정하였다. 세트 BE(best)는 주기 1초와 연성도 8에서의 유효주기 2.83초로 배율조정 했을 시 실 시간이력들의 응답스펙트럼이 목표스펙트럼과 유사한 형상을 가지는 시간이력을 선택하였으며, 이를 Fig. 2(a) 및 Fig. 3(a)에 나타내었다. 세트 UND(under)는 주기 1초에서 배율조정 되었을 시 관심주기영역에서 목표응답스펙트럼보다 작은 Fig. 2(b)와 같은 형상을 보이며, 유효주기 2.83초로 배율조정을 실행한 결과 응답스펙트럼의 형상이 목표스펙트럼 보다 보수적인 형상을 가지는 Fig. 3(b)의 지진파를 선택하였다. 세트 OV(over)

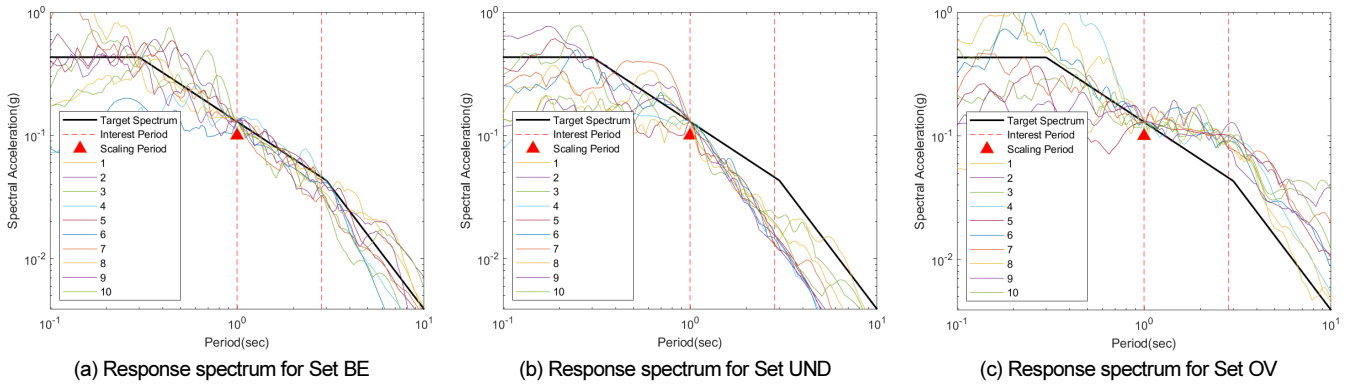


Fig. 2. Response spectrum for 1 sec period scaling per each set

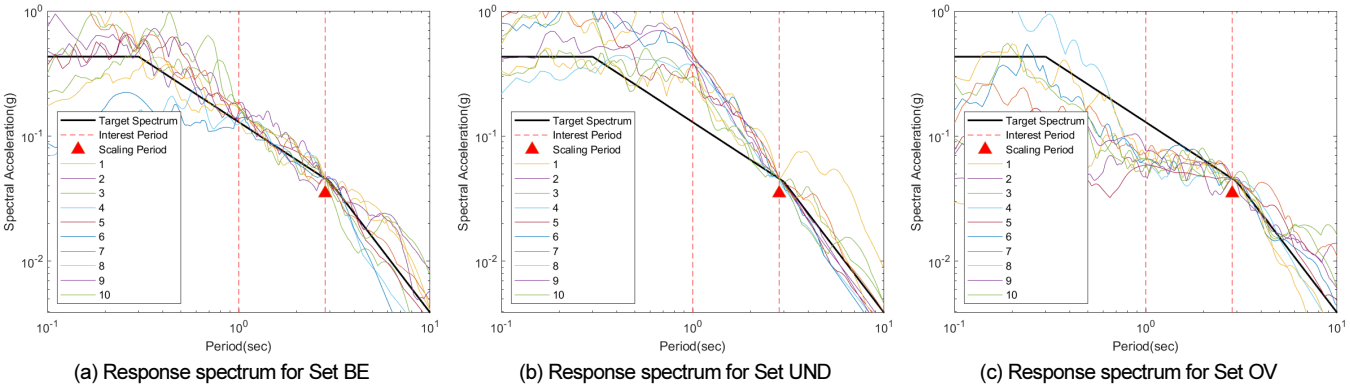


Fig. 3. Response spectrum for 2.83 sec period scaling per each set

은 세트 UND에 반하여 주기 1초에서는 Fig. 2(c)처럼 설계응답스펙트럼에 보수적이며 유효주기 2.83초에서는 Fig. 3(c)와 같이 배율조정 시 목표 응답스펙트럼보다 작은 형상을 가지는 시간이력을 선택하였다. 즉, 시간이력을 사용하여 주기 1초 및 주기 2.83초로 배율조정 한 뒤, 시간이력의 응답스펙트럼이 목표스펙트럼에 일치, 보수적 및 비보수적 형상에 따라 세트를 나누었다. 전체 시간이력의 목록은 Table 1에 제시하였다.

3.4 시간이력 부합 프로그램

주기 1초 및 유효주기 2.83초로 배율조정 된 시간이력을 RSPMatch 프로그램을 이용하여 목표응답스펙트럼에 부합시켰다. 이 프로그램에서는 Tapered Cosine 파형을 사용하여 실 지진기록의 비정상적인 특성을 유지하며, 목표응답스펙트럼과 동일한 응답 가속도를 갖게 해준다. 이는 $a(t)$ 가 초기가속도 시간이력인 경우, 계산된 응답스펙트럼이 실제 주파수 및 변위 시간이력을 유지하면서 전체 주파수 범위에서 목표스펙트럼과 일치하도록 $a_1(t)$ 로 수정하는 것이다.

$$a_1(t) = a(t) + \gamma \delta a(t) \tag{1}$$

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t) \tag{2}$$

여기서 γ 은 반복을 통해 보다 적합한 조정파형을 결정하기 위한 조정비율

이며 0~1의 값을 가진다. b_j 은 진폭을 결정한 조정함수이며 조정파형에 부합한 조정비율을 곱하여 진폭을 수정한다. $f_j(t)$ 은 시간에 따라 위상차 보정 및 조정파형의 중첩위치 등을 수정하는 조정함수의 집합이다. N 은 일치시킬 총 스펙트럼 포인트 수이며, 식 (1)과 식 (2)의 반복을 통해서 가속도 시간이력이 목표스펙트럼과 일치하게 된다[9, 10].

RSPMatch에 사용된 목표응답스펙트럼은 국내 표준설계응답스펙트럼과 동일하되, 각 부합주기 점의 간격을 로그눈금에서 등간격으로 설정하였다. 배율조정 된 각 시간이력을 RSPMatch를 이용해 목표응답스펙트럼에 부합한 시간이력을 생성하였다. 따라서 하나의 실 시간이력으로 주기 1초 및 주기 2.83초에 배율조정 된 시간이력 2개, 배율조정 뒤 스펙트럼 부합된 시간이력 2개로 총 4개의 시간이력을 생성하였다. 주기 1초로 배율조정 된 후 스펙트럼 부합된 시간이력을 각 세트 별로 나타낸 결과는 Fig. 4, 주기 2.83초로 배율조정 된 후의 응답스펙트럼은 Fig. 5와 같다. 또한 각 세트별 대표 시간이력의 가속도, 속도, 변위의 부합 전 후의 형상은 Fig. 6과 같다.

4. 시간이력 분석 및 단자유도 해석

4.1 스펙트럼 부합 변형된 시간이력 분석

실 지진기록과 생성된 시간이력을 비교하기 위하여 각 세트별 대표 시간이력의 PGA(Peak Ground Acceleration, PGA), CAV(Cumulate Absolute Velocity, CAV), AI(Arias Intensity, AI), 강진동지속시간인 AI 05-75

Table 1. List of seed motions for each set

Set Number	Event Number	Year	Earthquake Name	Magnitude	Station Name	Rupture Distance (km)
Set BE	1	1968	Borrego Mtn	6.63	San Onofre - So Cal Edison	129.11
	2	1979	Imperial Valley-06	6.53	Calexico Fire Station	10.45
	3	1983	Coalinga-01	6.36	Parkfield - Cholame 4W	46.35
	4	1983	Coalinga-01	6.36	Parkfield - Fault Zone 7	31.21
	5	1983	Coalinga-01	6.36	Parkfield - Stone Corral 3E	34
	6	1990	Manjil_Iran	7.37	Tehran - Building & Housing	174.55
	7	2000	Tottori_Japan	6.61	OKYH14	21.22
	8	2000	Tottori_Japan	6.61	OKYH09	26.51
	9	2007	Chuetsu-oki_Japan	6.8	Kawaguchi	29.25
	10	2007	Chuetsu-oki_Japan	6.8	NIG024	25.33
Set UND	1	1952	Southern Calif	6	San Luis Obispo	73.41
	2	1967	Northern Calif-05	5.6	Ferndale City Hall	28.73
	3	1971	San Fernando	6.61	Fairmont Dam	30.19
	4	1973	Point Mugu	5.65	Port Hueneme	17.71
	5	1979	Coyote Lake	5.74	Gilroy Array #2	9.02
	6	1980	Mammoth Lakes-03	5.91	Long Valley Dam (L Abut)	18.13
	7	1987	Whittier Narrows-01	5.99	San Gabriel - E Grand Ave	15.2
	8	1989	Loma Prieta	6.93	Coyote Lake Dam - Southwest Abutment	20.34
	9	1994	Northridge-01	6.69	LA - Sepulveda VA Hospital	8.44
	10	2007	Chuetsu-oki_Japan	6.8	Joetsu Yasuzukaku Yasuzuka	25.52
Set OV	1	1968	Borrego Mtn	6.63	Pasadena - CIT Athenaeum	207.14
	2	1971	San Fernando	6.61	Cholame - Shandon Array #2	218.13
	3	1971	San Fernando	6.61	Maricopa Array #3	110.18
	4	1971	San Fernando	6.61	Tehachapi Pump	63.79
	5	1979	Imperial Valley-06	6.53	Brawley Airport	10.42
	6	1979	Imperial Valley-06	6.53	El Centro Array #11	12.56
	7	1979	Imperial Valley-06	6.53	Parachute Test Site	12.69
	8	1979	Imperial Valley-06	6.53	Plaster City	30.33
	9	1992	Cape Mendocino	7.01	Fortuna - Fortuna Blvd	19.95
	10	2007	Chuetsu-oki_Japan	6.8	Joetsu Ogataku	17.93

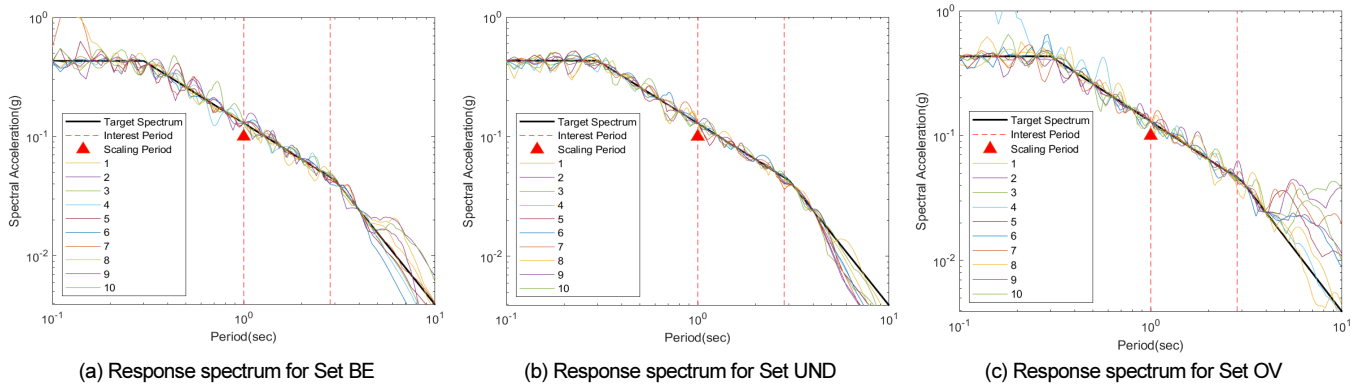


Fig. 4. Response spectrum for 1 sec period scaling & matched per each set

(Arias Intensity 5%~75% 구간) 및 스펙트럼 부합 변형 후 값의 증가 또는 감소량은 Table 2와 같다. Table 2에 따르면 세트 BE, 세트 UND, 세트 OV의 지반운동 강도 계수에서 다른 세트에 비해 세트 BE의 부합 변형 후의 증

가 또는 감소량이 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 관심주기에서 목표 응답스펙트럼과 가장 유사한 시간이력이기에 조정파형의 추가가 다른 세트에 비해 많지 않아 원본파형의 변형이 크지 않기 때문이다. 또한 모든 세

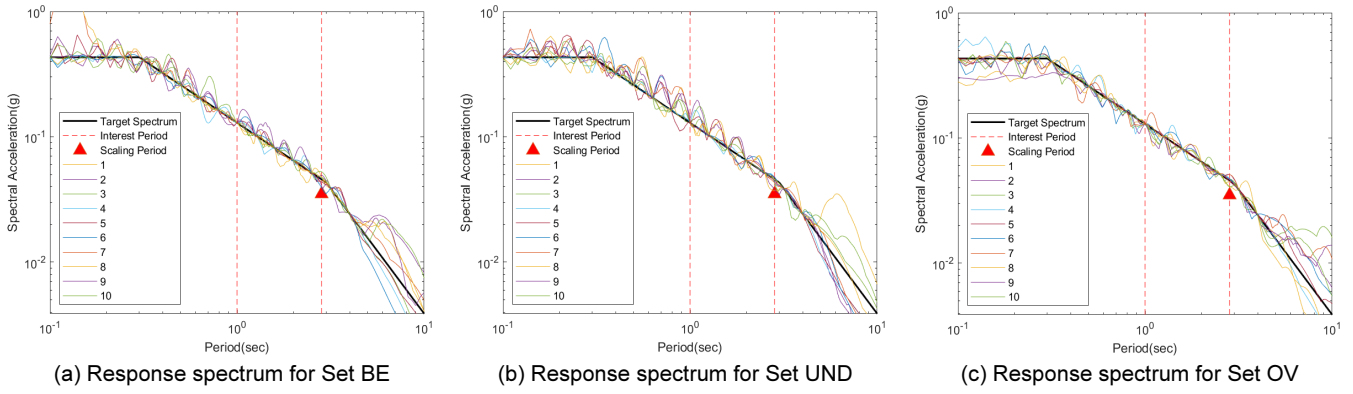


Fig. 5. Response spectrum for 2.83 sec period scaling & matched per each set

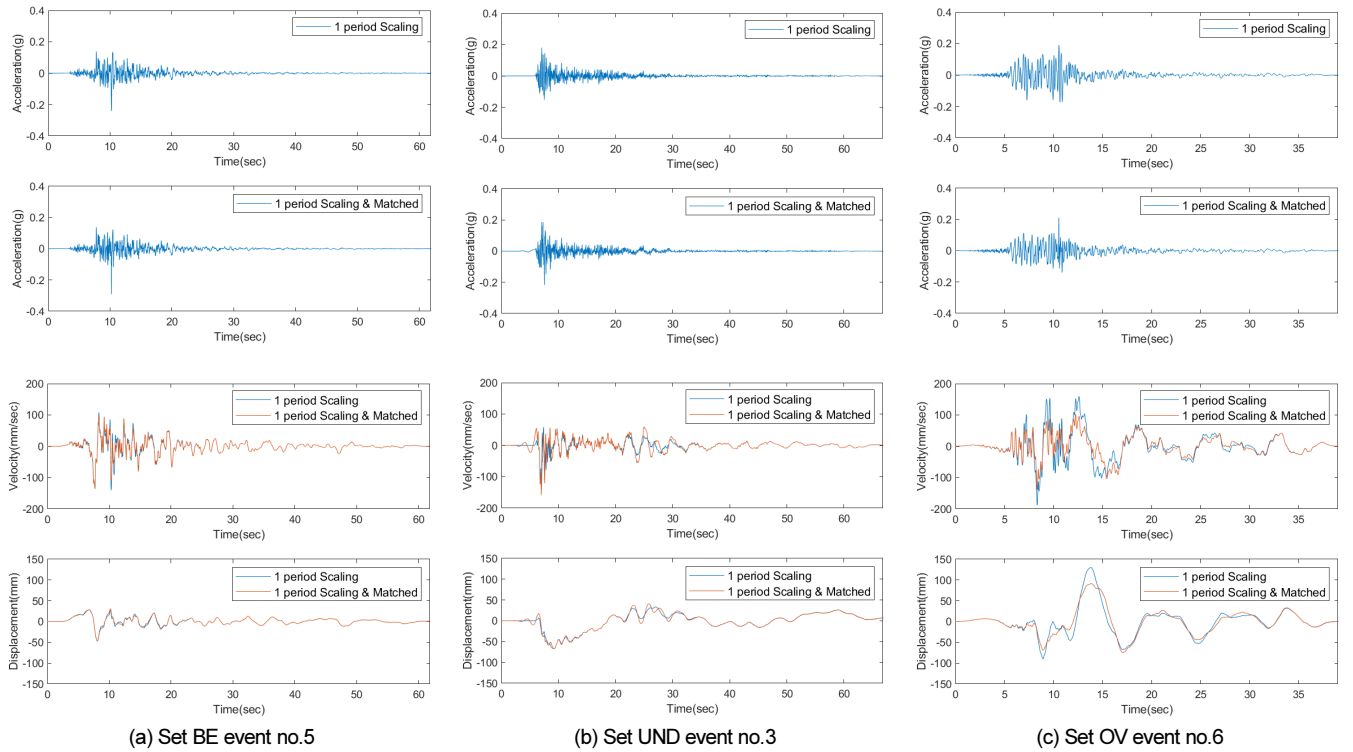


Fig. 6. Acceleration, velocity, displacement of time histories before and after matched

Table 2. Ground motion intensity measures of the time histories for each set

Set Number	Event Number	Scaling Period	Spectrum Matching	Ground motion intensity measures			
				PGA (g)	CAV	AI	AI 05-75 (sec)
Set BE	5	1	Scaling	0.241	0.537	0.003692	4.84
			Scaling & Matched	0.291 (21% ↑)	0.516 (4% ↓)	0.003275 (11% ↓)	5.01 (4% ↑)
		2.83	Scaling	0.255	0.569	0.004140	4.84
			Scaling & Matched	0.291 (14% ↑)	0.539 (5% ↓)	0.003494 (16% ↓)	5.06 (5% ↑)
Set UND	3	1	Scaling	0.180	0.453	0.002777	3.58
			Scaling & Matched	0.217 (21% ↑)	0.473 (5% ↑)	0.002788 (0.4% ↑)	3.98 (11 ↑)
		2.83	Scaling	0.361	0.907	0.011164	3.58
			Scaling & Matched	0.192 (47% ↓)	0.778 (14% ↓)	0.005879 (47% ↓)	8.65 (142% ↑)
Set OV	6	1	Scaling	0.191	0.599	0.005644	4.50
			Scaling & Matched	0.211 (11% ↑)	0.512 (15% ↓)	0.003646 (35% ↓)	4.79 (6% ↑)
		2.83	Scaling	0.961	0.302	0.001428	4.49
			Scaling & Matched	0.102 (89% ↓)	0.361 (20% ↑)	0.002492 (75% ↑)	4.46 (1% ↓)

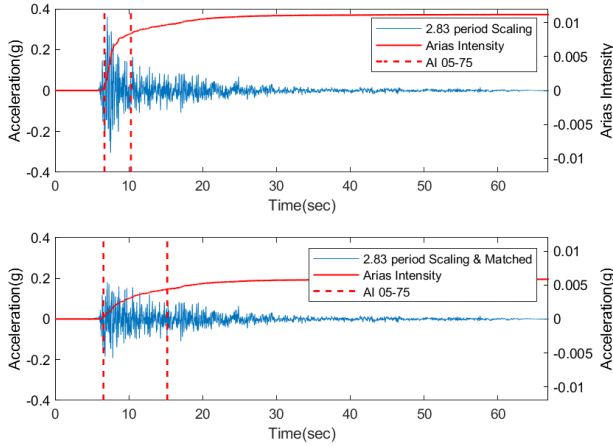


Fig. 7. Strong motion duration and AI change as the result of matched at 2.83 sec period (Set UND event no.3)

트의 시간이력에서 PGA 변화량을 확인 할 수 있는데, 이는 배율조정 시 PGA가 아닌 구조물의 고유주기 및 유효주기에 맞았기 때문에 조정파형추가로 PGA에 많은 변화가 나타난 것으로 보인다. 배율조정 값에 따라 PGA, CAV, AI의 값의 변화량 차이가 나타나기 때문에 구조물의 주기 또는 보유연성도에 따른 유효주기로 배율 조정 시, 중요시 하는 지반운동 강도 계수 값에 따라 원본 시간이력을 비교하여 배율조정 한 후, 스펙트럼 부합 변형을 하는 것이 타당하다.

세트 UND의 주기 2.83초의 배율조정과 스펙트럼 부합 변형의 결과값을 비교할 시, AI 05-75에서 2배 이상의 차이를 볼 수 있다. 이는 Fig. 7과 같이 조정파형이 지반운동 세기를 감소시키도록 추가됨에 따라 AI가 낮아지며 이에 따라 강진동지속시간 또한 늘어난 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 스펙트럼 부합 변형 실행으로 원본 파형의 특정 시간 구간에 변형이 커지면 전체 강진동지속시간에 영향을 주는 경우도 있다.

4.2 비선형 거동 및 등가점성감쇠 선형 거동

해석프로그램을 활용하여 단자유도모형을 생성한 뒤, 시간이력 입력 후 응답결과를 비교하였다. 실제 구조물에서 여러 가지 감쇠기구로 소산되는 총에너지와 점성 감쇠기가 소산시키는 진동에너지가 서로 같다고 둬므로써 감쇠상수를 정할 수 있다. 이를 등가점성감쇠(equivalent viscous damping)라 하며 등가점성감쇠를 사용한 선형해석으로 비선형 해석의 응답 값을 유추할 수 있다[24]. 따라서 연성도 8의 유효주기 2.83초에서 등가점성감쇠를 활용한 선형해석과 주기 1초에서의 연성도 8의 비선형해석을 실행하여 응답 값을 비교해 보았다. 표기의 편리성을 위하여 연성도 8의 유효주기 2.83초 등가점성감쇠 선형해석을 등가감쇠선형해석(equivalent linear)이라 칭하고 주기 1초에서의 연성도 8의 비선형해석을 비선형해석(bi-linear)이라 칭한다.

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} \quad (3)$$

ξ_{eq} 은 등가점성감쇠이며 Fig. 8과 같이 E_D 는 소산에너지, E_{SO} 은 최대변

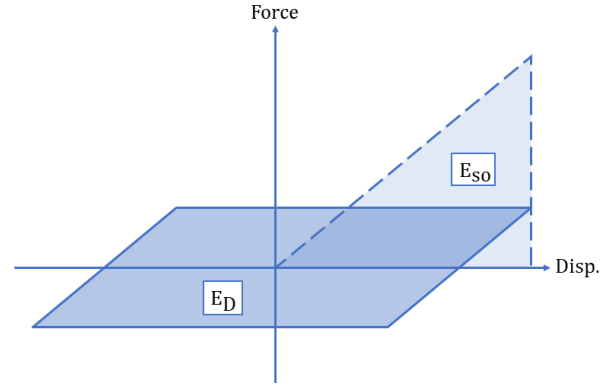


Fig. 8. Maximum deformation energy (E_{SO}) and dissipation energy (E_D) of equivalent viscous damping analysis

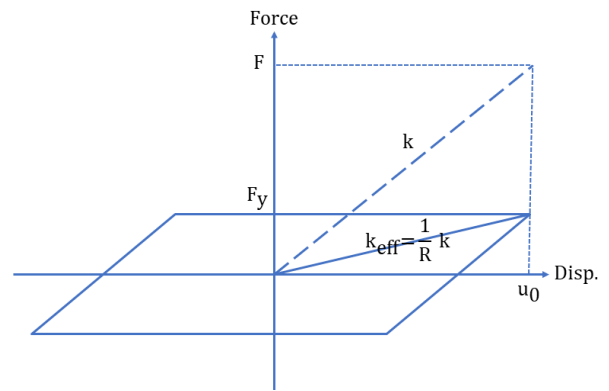


Fig. 9. Stiffness and yield stress of equivalent linear and bi-linear analysis according to ductility (R)

형에너지이다. 이력감쇠비는 연성도 8에서 식 (3)을 이용하여 7%로 구할 수 있었으며, 일반적인 점성감쇠비 5%을 더해 등가점성감쇠비 12%의 감쇠비로 주기 2.83초를 가지는 단자유도 등가점성선형해석을 수행하였다.

비선형해석 시, 표준설계응답스펙트럼을 토대로 식 (4)을 이용하여 항복응력을 계산하였다.

$$u_0 = D = \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)^2 A \quad (4)$$

여기서 u_0 및 D 는 변위, T_n 는 고유주기이며 A 는 스펙트럼가속도 값이다.

$$F = k \times u_0 \quad (5)$$

F 는 탄성응답 시 하중이며 k 는 강성, u_0 은 변위를 의미한다. 표준설계 응답스펙트럼에서 주기 1초에서의 스펙트럼가속도 값은 $A = 0.1294 g$ 이며[1], 식(4)을 활용하여 Fig. 9와 같이 u_0 을 구할 수 있다. u_0 을 식(5)에 대입하여 F 를 구하였으며, 연성도 8에서의 항복응력인 F_y 을 계산하였다. 이를 이용해 주기 1초, 연성도 8의 항복응력 F_y 을 가지는 단자유도의 비선형 해석을 수행하였다.

Table 3. Equivalent linear and bi-linear analysis responses for each set

Set Number	Event Number	Scaling Period	Spectrum Matching	Displacement		Dissipation Energy
				Equivalent linear	Bi-linear	Bi-linear
Set BE	5	1	Scaling	2.024	2.186	2.291
			Scaling & Matched	1.961 (3% ↓)	2.235 (2% ↑)	2.085 (9% ↓)
		2.83	Scaling	2.143	2.192	2.520
			Scaling & Matched	1.978 (8% ↓)	2.190 (0.06% ↓)	2.178 (14% ↓)
Set UND	3	1	Scaling	1.054	0.977	0.921
			Scaling & Matched	2.090 (98% ↑)	1.651 (69% ↑)	1.348 (46% ↑)
		2.83	Scaling	2.113	4.115	3.070
			Scaling & Matched	2.022 (4% ↓)	2.181 (47% ↓)	2.040 (34% ↓)
Set OV	6	1	Scaling	3.707	3.925	3.320
			Scaling & Matched	1.875 (49% ↓)	1.772 (55% ↓)	1.967 (41% ↓)
		2.83	Scaling	1.864	0.891	0.942
			Scaling & Matched	2.076 (11% ↑)	1.010 (13% ↑)	1.419 (51% ↑)

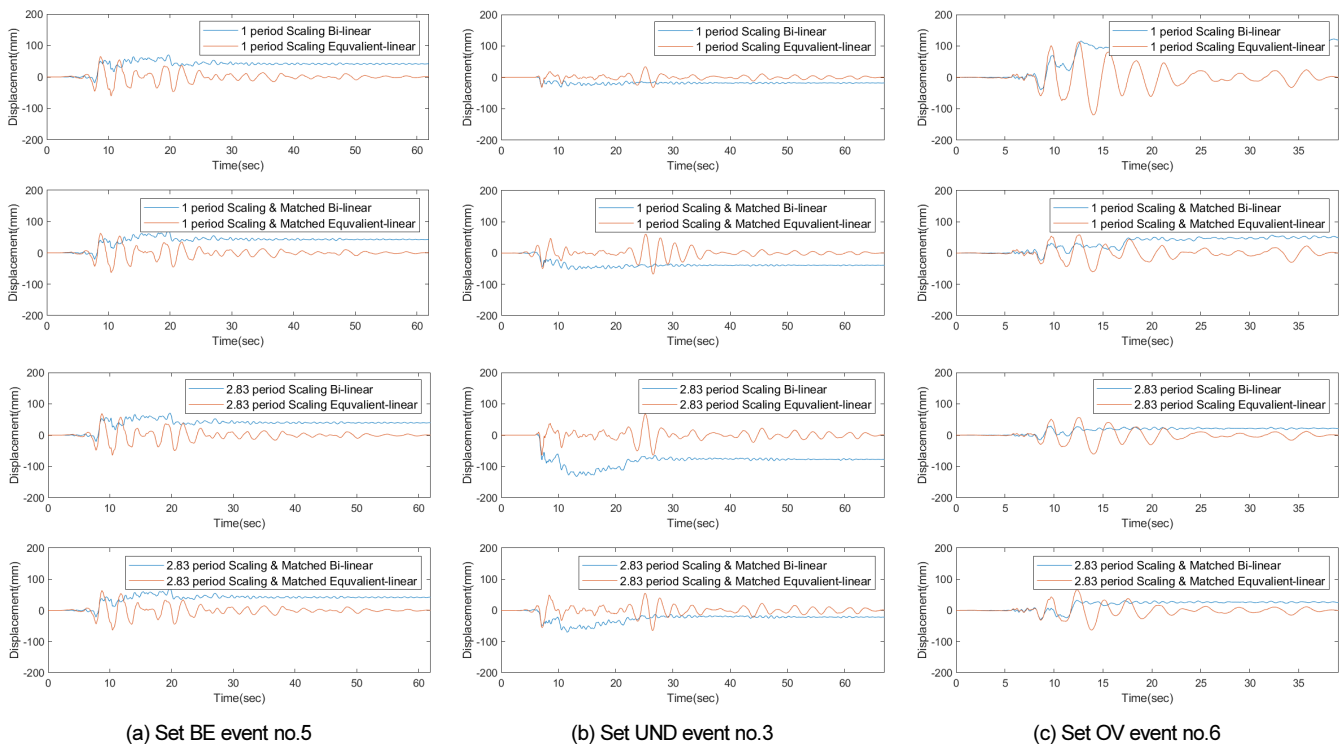


Fig. 10. Displacement Response by input motions scaled at 1 sec and 2.83 sec period, and matched input motions set

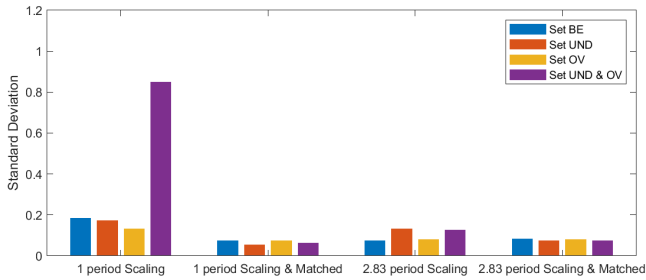
4.3 시간이력에 따른 단자유도모델 해석결과

해석결과 세트에 따른 등가감쇠선형해석에서의 최대변위, 비선형해석의 최대변위(u) 및 소산에너지를 표준설계응답스펙트럼의 1초 주기에서의 최대변위(u_0) 및 소산에너지(E_D)를 기준으로 나누어 각각의 비를 계산하였으며 Table 3와 같다.

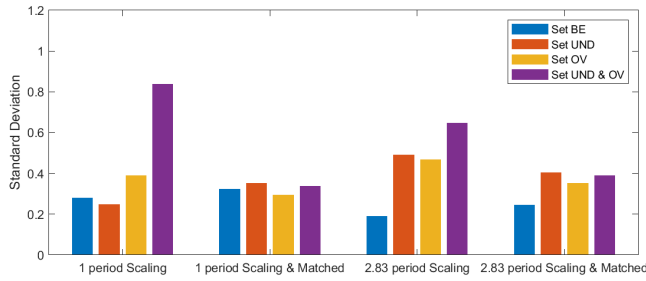
배율조정 및 스펙트럼 부합 변형의 결과 생성된 시간이력에 따라 변위 그래프의 형상의 차이를 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 모든 세트의 등가감쇠 선형해석결과는 스펙트럼 부합이 실행되지 않은 주기 1초 배율조정을 제외한 3개의 변위 그래프에서 각 세트별 최대 변위 비의 값 및 시간에 따라 변화

하는 변위 그래프가 동일한 형상을 보였다. 이는 스펙트럼 부합 및 배율조정을 통해 설계스펙트럼의 주기 2.83초에 부합하는 시간이력이 생성되었기 때문이다. 세트 BE는 배율조정 및 스펙트럼 부합 변형의 유무와 관계없이 실 지진기록의 응답스펙트럼이 목표응답스펙트럼과 유사했기 때문에 실 지진기록으로 생성된 4개의 시간이력에서 등가감쇠선형해석과 비선형해석에서 유사한 응답을 확인할 수 있었다. 하지만 세트 UND와 세트 OV에서는 스펙트럼 부합 변형 후, 조정과형이 추가됨에 따라 조정과형의 변동성이 크기 때문에 배율조정 된 시간이력과 스펙트럼 부합 변형 시간이력이 큰 차이를 보였으며 각 세트에 따라 응답의 경향성을 확인하기 어려웠다.

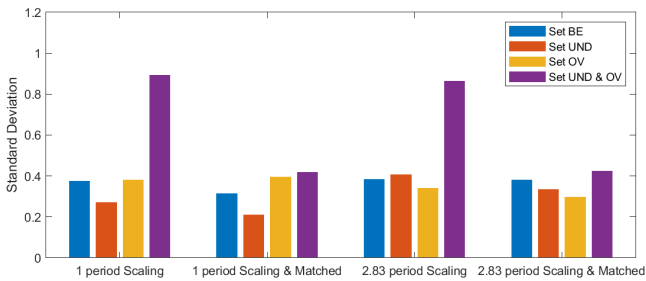
배율조정 주기와 스펙트럼 부합 변형 실행 여부 그리고 세트에 따라서 표준편차를 구해보았다. 목표응답스펙트럼과 가장 유사한 형상의 시간이



(a) Maximum displacement of equivalent linear analysis



(b) Maximum displacement of bi-linear analysis



(c) Dissipation energy of bi-linear analysis

Fig. 11. Standard deviation of SDOF result by each set

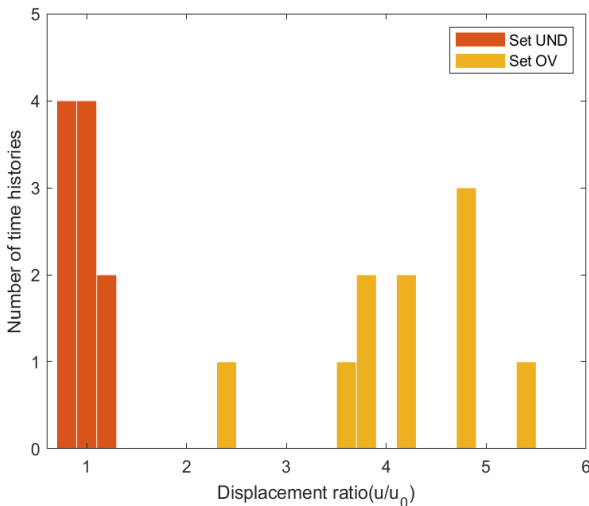


Fig. 12. Period 1 sec scaling and equivalent linear analysis displacement ratio of SDOF Set UND and Set OV histogram

적인 세트 BE의 스펙트럼 부합 변형 시간이력이 비선형해석에서 표준편차가 작은 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 설계스펙트럼 부합을 위한 시간 이력 선택 시, 설계스펙트럼과 유사한 형상의 응답스펙트럼을 가지는 시간

이력을 선택하는 것이 중요하다. 등가감쇠선형해석에서 배율조정을 했을 경우와 배율조정 및 스펙트럼 부합 변형을 모두 실행한 응답을 비교를 통해 배율조정 및 스펙트럼 부합 변형 시간이력의 표준편차가 더 작은 것을 확인할 수 있었다. 이는 조정파형 추가로 인한 스펙트럼 부합을 통해 응답의 결과 유사해진 것으로 유추할 수 있다. 또한 등가감쇠선형해석과 달리 비선형해석의 경우 스펙트럼 부합 후에 표준편차가 증가한 세트를 확인할 수 있다. 이는 등가감쇠선형해석의 경우, 선형해석의 특징으로 응답스펙트럼과 부합한 지진파일수록 작은 표준편차의 값을 가질 수 있다. 하지만 비선형해석의 경우 스펙트럼 부합 과정으로 인해 다양한 불확실성이 발생할 수 있기에 스펙트럼 부합 후에도 표준편차의 상승이 나타날 수 있다. Fig. 11의 표준편차의 값에 따라 등가감쇠선형해석에 비해 비선형해석 표준편차가 높은 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 구조물 응답의 분포를 산정할 필요가 있을 경우 등가감쇠선형해석보다 비선형해석이 필요함을 알 수 있다.

하지만 위와 같은 시간이력을 선택하는 것에 있어서 선택 가능한 지반운동 데이터가 충분치 않은 경우 세트 UND 및 세트 OV과 같은 설계스펙트럼과 부합하지 않는 시간이력을 선택할 수밖에 없을 수 있다. 이를 고려하여 세트 UND와 세트 OV의 값을 함께 사용하여 표준편차를 구해보았으며, 이는 Fig. 11에서 확인할 수 있으며 각각의 세트를 사용하는 것보다 높은 표준편차 값을 얻을 수 있었다.

또한 분포를 확인하기 위하여 Fig. 12와 같이 세트 UND와 세트 OV에서 주기 2.83초에서의 등가감쇠선형해석의 표준편차 값을 히스토그램으로 그려보았다. 실 지진기록 선택 시 두 세트에 대해 목표스펙트럼과 실 지진기록 스펙트럼의 차이를 동일하게 선택하기가 어려웠기 때문에 선택된 세트 OV의 시간이력이 세트 UND에 비해 응답스펙트럼에서 더 큰 분포를 가졌다. 이 때문에 구조물의 응답에서도 또한 세트 UND에 비해 세트 OV가 더 넓은 분포를 보였다. 특히 각각의 세트를 사용하여 구한 응답의 분포보다 세트 UND와 세트 OV를 함께 사용할 시 더 넓은 분포를 확인할 수 있다. 즉 응답의 표준편차가 중요한 경우 하나의 세트를 선정하여 결과 값을 도출해야 하는 것이 더 당할 수 있으며 여러 세트를 함께 선택할 시 과도한 응답의 표준편차를 얻을 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 설계응답스펙트럼에 부합되는 시간이력 개발을 위한 실 지진기록 선택에 참고가 되는 해석을 수행하였다. 이를 위하여 응답스펙트럼 형상에 따른 시간이력을 세트별로 구분하였으며 스펙트럼 부합 방법 중 시간영역 변형 부합 방법의 RSPMatch 프로그램을 사용하였다.

스펙트럼 부합 변형 결과 시간이력의 지반운동 강도 계수의 차이를 확인할 수 있었다. 목표응답스펙트럼과 유사한 시간이력이 지반강도계수의 변화율이 가장 낮다. 배율조정계수에 따라 지반운동 강도 계수의 증가 및 감소율의 차이가 있으므로 원하는 계수의 값 변화율에 따라 배율조정을 실행하며, 스펙트럼 부합 시 PGA 및 AI 05-75 변화에 주의하여 시행하여야 한다.

등가감쇠선형해석과 비선형해석을 통해 단자유도 변위 응답 및 소산에너지의 값을 도출하여 각 세트별 응답의 표준편차의 값을 구하였다. 이 결과를 통하여 스펙트럼 부합에 가장 유용한 응답스펙트럼의 형상은 목표스펙트럼과 가장 유사한 시간이력이며, 그 외의 응답스펙트럼 형상을 사용할 경

우 변동성이 크다는 것을 알 수 있었다. 형상이 다른 두 가지 시간이력을 원본 지진으로 사용할 경우 각각을 사용할 때 보다 변동성이 매우 커질 수 있으며 높은 표준편차 및 분포를 가질 수 있기에 응답의 분포가 중요한 경우에는 독립적인 세트 사용이 필요하다.

스펙트럼 부합 절차에서 원본 시간이력에 추가되는 파형은 지반운동 강도 계수에도 영향을 미치며, 비선형 거동에도 큰 영향을 미친다. 그러나 어떠한 스펙트럼 형상 세트를 사용하는지에 따른 경향성은 뚜렷하지 않았다. 따라서, 이 연구의 결과는 원본시간이력 선택 기준을 구체적으로 어떻게 결정해야 하는지는 제시하지는 않았다. 그러나 지속적인 관련 연구로 향후 시간이력 선택에 대한 명확한 기준을 마련하는데 기반 연구가 될 것이다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2019R111A3A01058812) 및 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20181510102410)입니다.

/ REFERENCES /

1. KDS 17 10 00, Seismic design, Earthquake Engineering Society of Korea; c2018, p.12-13.
2. AASHTO, Guide specifications for seismic isolation design, American Association of State Highway and Transportation Officials; c2017, p.85-86.
3. ASCE 4-16, Seismic analysis of safety-related nuclear structures: American Society of Civil Engineers; c2017, p.6.
4. ASCE 43-05, Seismic design criteria for structure, systems, and components in nuclear facilities: American Society of Civil Engineers; c2005, p.8.
5. NUREG-0800, Standard review plan 3.7.1 Seismic design parameters, US Nuclear Regulatory Commission; c2014, p.1-6.
6. USNRC, A Performance-based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion, 1,208 : U.S Nuclear Regulatory Commission; 2007 Mar, F-1 p.
7. Grant DN, Greening PD, Taylor ML, Ghosh B, Seed record selection for spectral matching with RSPMatch2005, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008 Oct.
8. Atik LA, Abrahamson N, An improved method for non-stationary spectral matching, Earthquake Spectra, 2010 Aug;26:601-617.
9. Hancock J, Watson-Lamprey J, Norman AA, Julian JB, Markatis A, McCoy E, Mendis R, An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelet,

- Journal of Earthquake Engineering, 2006;10:67-89.
10. Lilhanand K, Tseng WS, Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple-damping design spectra, Proceeding of 9th Wold Conference, 1988 Aug;2:819-824.
11. Kim DS, Park WS, Koh HM, Choi CY, Failure probability of nonlinear SDOF subject to scaled and spectrum matched input ground motion models, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2008 Feb;12(1):11-20.
12. ASCE 7-16, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: American Society of Civil Engineers; c2017, p.660-661.
13. KEPIC STB, Seismic analysis and seismic capacity evaluation of nuclear facilities, Korea Electric Power Industry Code; c2016, p.12-14
14. Kaul M, Spectrum-consistent time-history generation, Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978;104(4):781-788.
15. Abrahamson NA, Non-stationary spectral matching, Seismological Research Letters, 1992;63(1):30.
16. Choi DH, Lee SH, Multi-damping earthquake design spectra-compatible motion histories, Nuclear Engineering and Design, 2003;226(3):221-330.
17. SeismoApps Technical Information Seet, Seismosoft Ltd; c2018, 13 p.
18. Park G, Hong KN, Han SJ, Kim JS, Generation of artificial time history covering design response spectrum by two modification functions, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2016 Feb; 36(1):1-11.
19. Kim JH, Kim MK, Choi IK, Response of base isolation system subjected to spectrum matched input ground motions, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2013 Mar;17:89-95.
20. Kim HU, Joo KH, Noh SH, Jung CG, Behavior analysis of a seismically isolated NPP structure by varying seismic input generation method and strong ground motion duration, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2013 Aug;17(4):187-195.
21. Hong LL, Huang YC, A new algorithm in generation spectrum-compatible ground accelerograms, Journal of Chinese Institute of Engineers, 2020 Jan;43(3):241-248.
22. Baker JW, Conditional mean spectrum: Tool for ground motion selection, Journal of Structural Engineering, 2011;137(3):322-331.
23. KDS 41 17 00, Building seismic design, Architectural Institute of Korea; c2019, p.19.
24. Chopra AK, Dynamics of Structures: theory and application to earthquake engineering, 5th ed, Prentice Hall; c2017, p.115.
25. PEER, Users manual for the PEER ground motion database web application, Pacific Earthquake Engineering Research Center; c2010, 74 p.