

# 증폭계수를 이용한 진동 예측기법의 적용

## Application of Vibration Prediction Method Using Response Spectrum with Amplification Factor

심재수\*      황의승\*\*      김덕중\*\*\*      윤종오\*\*\*\*  
Shim, Jae Soo      Hwang, Eui seung      Kim, Duk Joong      Yun, Jong Oh

### 국문요약

여러 가지 진동원으로부터 전파되는 진동으로 인하여 진동피해민원이 계속적으로 증가하는 추세에 있으나 이에 대한 진동규제기준이 미흡한 상태이다. 진동피해의 예측이나 경감방안을 마련하기 위해서 간편하고 실용적인 진동예측이 절실한 상태이다. 본 연구에서는 Newmark와 Hall이 제시한 증폭계수의 개념을 도입한 응답스펙트럼을 이용하여 쉽게 진동을 예측할 수 있는 기법을 제시하고 그 적용성을 검토하고자 한다. 이를 위하여 운행중인 지하철 구조물 내부 및 지상과 건물에서의 진동을 측정하였으며 제시된 방법으로 분석한 결과 본 방법이 진동예측에 손쉽게 적용될 수 있음을 보여 주었다.

주요어 : 진동예측, 증폭계수, 응답스펙트럼

### ABSTRACT

Damages and public complaints are increased due to construction noise and vibration from several sources. It is urgently needed to develop the easy and practical method to estimate the vibration effect. In this study, to predict the vibration effect, the method using the response spectrum with amplification factor concepts proposed by Newmark and Hall is used. Also the applicability of the method is examined. Vibration measurement on subway structure, foundation and building structures are performed and the results show that the provided method is practical and can be used to predict the vibration effect.

**Key words** : vibration prediction, amplification factor, response spectrum

## 1. 서 론

날로 증가되는 대도시의 교통난을 해소하기 위해 지하철이 대중교통수단으로 계획단계에 있거나 건설 중이다. 그러나 지하철건설단계의 발파와 열차의 운행으로 의해 발생하는 진동으로 진동피해민원이 계속적으로 증가하는 추세에 있다. 이를 줄이기 위하여 각종 진동규제기준이 제정되어 있으나 기존방법은 지하철 현장 주변에서 피해를 받고 있는 구조물의 진동을 각 건물 및 지반진동 계측을 전제로 하

고 때로는 건물의 고유진동수와 감쇠비 측정을 필요로 하기 때문에 많은 시간과 경비가 뒤따른다.

따라서 교통시설의 계획 및 설계에 있어 인근 구조물의 피해 여부나 피해 정도를 예측함으로써 피해를 최소화하고 또한 피해경감 방안을 모색할 수 있도록 간편하고 실용적인 방안이 마련되어야 할 것이다. 구조물의 진동해석방법으로 응답스펙트럼을 이용하는 응답스펙트럼해석법과 가속도기록에 의한 시간이력 해석법이 사용되고 있다.<sup>(1),(3)</sup>

응답스펙트럼해석법은 지반운동에 의한 구조물의 응답특성을 나타내는 수단으로써의 그 중요성이 지진공학 분야에서 오래 전부터 인정되어 왔다. 이 방법은 지반운동에 의한 구조물의 최대응답을 스펙트럼을 이용하여 나타내는 방법으로 시간에 따른 구

\* 정회원·경희대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원·경희대학교 토목공학과 조교수

\*\*\* 삼안기술공사, 전 경희대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\*\* 우대기술단, 전 경희대학교 토목공학과 석사과정

조물의 거동을 알 수 없는 단점이 있으나 구조물의 동적 특성을 고려할 수 있고, 계산이 간편하여 내진 설계 규정에 널리 이용되고 있다. 한편 Newmark과 Hall은 측정된 기록을 분석하여 응답스펙트럼을 작성하는 과정에서 주파수의 영역을 설정하여 저주파 영역은 변위의 영역으로, 중주파수의 영역은 속도의 영역으로, 또한 고주파의 영역은 가속도영역으로 설정하고 감쇠비에 따른 증폭계수를 산정하여 직선의 형태로 응답스펙트럼을 나타냈다.<sup>(2),(5)</sup>

본 연구에서는 Newmark과 Hall이 제시한 응답계수의 개념을 도입하여 건물의 진동을 쉽게 실용적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하고 그 적용성을 검토하고자 한다.

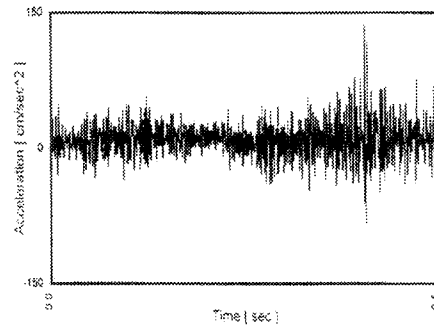
이를 위하여 현재 운행중인 지하철노선부근에서 열차운행에 따른 진동을 실측하고 이를 분석하여 지하철의 진동특성 및 구조물의 동적 특성을 파악하며 이를 Newmark과 Hall이 제시한 응답스펙트럼의 증폭계수 개념을 적용하여 구조물의 응답을 실용적으로 예측한다.

## 2. 현장계측

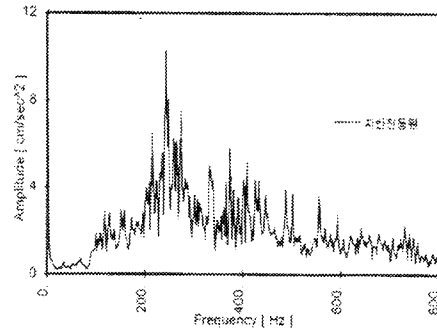
본 연구를 위한 현장계측으로 서울특별시 2기 지하철 노선의 시험운행 중 지하철 구조물 및 지하철 부근 지상에서의 측정과 기존 2호선과 3호선 지하철 노선에 인접한 각각의 건물 내부 지하실 및 지상1층에서 구조물의 기초와 각각의 부재별로 구조물의 진동측정을 실시하였다. 지하철 노선은 대부분 도로의 수직지하에 위치하므로 차량으로 인한 진동 영향으로 진동을 측정하기에 용이하지 않았으나 도로상의 차량이 비교적 적은 새벽시간을 이용하여 계측하였으며 차량에 의한 주파수 특성이 지하철과 확실히 다르므로 측정자료 분석후 차량진동에 의한 noise가 포함되지 않은 자료를 사용하였다.

### 2.1 지하철 구조물 내부에서의 측정

지하철 구조물 내부에서의 측정은 터널형태와 박스형태 구조물에서 실시하였으며, 그림 1에서 측정된 가속도와 주파수 분석결과의 대표적인 예를 보여주고 있다. 지반진동원에서의 주진동수는 약 250Hz 정도인 것으로 관측되었다.



(a) 가속도 기록



(b) 주파수 분석

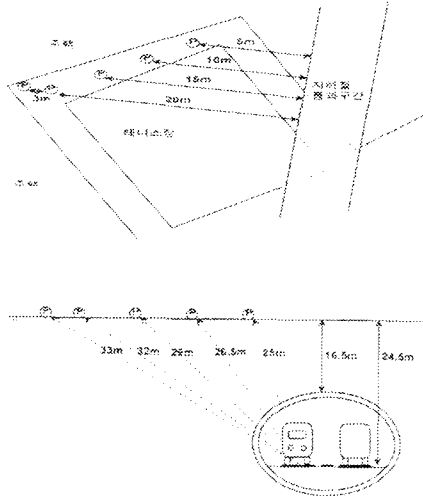
그림 1 터널내부에서 측정된 가속도 및 주파수 분석

### 2.2 지상 계측

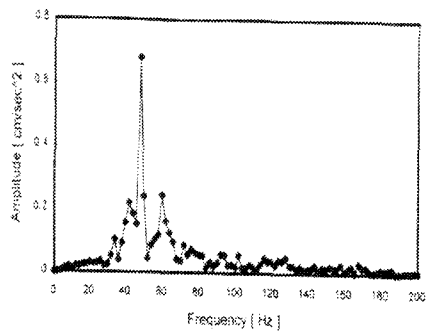
지상에서의 계측으로 거리에 대한 감쇠를 고려하기 위한 측정(현장 1, 2)과 구조물의 응답을 고려하기 위한 측정(현장 3, 4)이 실시되었다. 현장 1, 2에서는 레일의 중앙에서부터 5m~30m지점까지 측정하였으며 직선거리로 계산하면 약 25m~33m에 이른다.

거리별 각 측정에서는 30여회 이상의 측정을 실시하였다. 현장 1, 2에서 가속도 진동을 주파수 분석한 대표적 결과는 그림 2 및 3과 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 40~60Hz에서는 다른 주파수보다 진폭이 크게 나타났다.

현장 3, 4에서는 각 부재별 가속도를 계측하여 건물의 기초에서 계측한 자료와 상호비교, 검토를 하였다. 현장 3, 4의 개략도 및 주파수 분석결과는 그림 4, 5와 같다

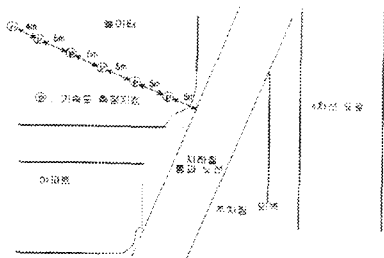


(a) 측정 현장의 개략도

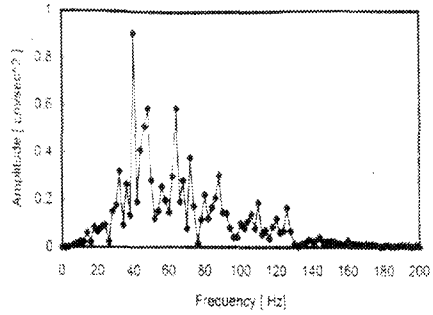


(b) 주파수 특성

그림 2 현장 1의 개요 및 주파수 특성

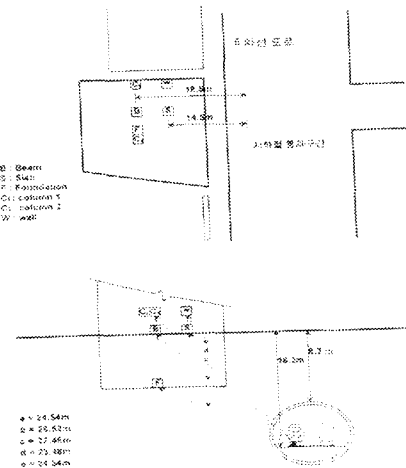


(a) 측정현장의 개략도

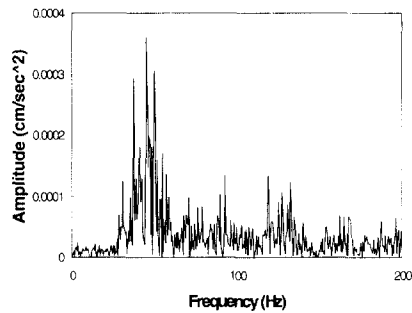


(b) 주파수 특성

그림 3 현장 2의 개요 및 주파수 특성

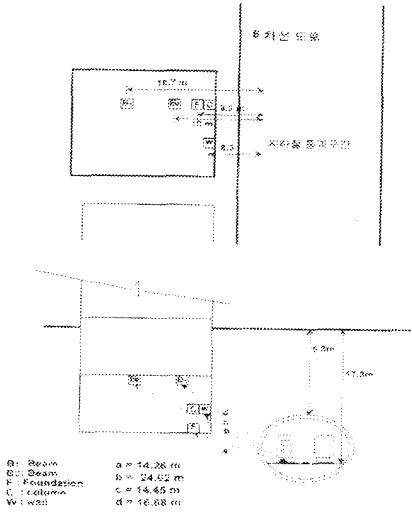


(a) 측정현장의 개략도

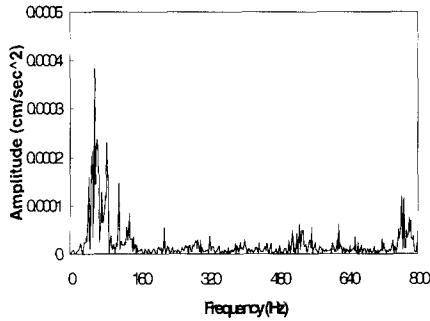


(b) 주파수 특성

그림 4 현장 3의 개요 및 주파수 특성



(a) 측정현장의 개략도



(b) 주파수 특성

그림 5 현장 4의 개요 및 주파수 특성

### 3. 지하철 진동에 의한 구조물의 응답 스펙트럼

지하철 진동에 의한 구조물의 응답스펙트럼은 시간이력에서 측정된 이격거리별 측정치를 단자유도 계 진동계에 가하고 감쇠비와 구조물의 고유진동수를 변화시키면서 구조물의 각 고유진동수에 대한 각각의 최대응답으로 결정된다. 그러나 이러한 방법으로 구조물의 모든 응답(가속도, 속도, 변위)을 계산하기보다는 실제 구조물의 감쇠비가 10%이내라는 특성을 이용하여 시간이력에 대한 구조물의 변위 응답만을 구하고 이를 이용해서 속도 응답스펙

트럼은 변위 응답스펙트럼에 구조물의 고유진동수를 곱한 값을 사용하고 가속도 응답스펙트럼은 속도 응답스펙트럼에 구조물의 고유진동수를 곱한 값을 사용할 수 있는데 이것을 유사응답스펙트럼이라 한다. 그림 6과 그림 7은 지하철 진동에 의한 유사응답스펙트럼과 실제 구조물의 응답스펙트럼과의 비교이다. 그림에서 나타난 바와 같이 가속도에 대한 응답은 주진동수(약 40Hz)보다 높은 진동수에서 그 결과가 유사하나 주진동수 부근이나 저진동수 영역에서는 차이를 보이고 있으며 속도 응답스펙트럼의 경우에는 주진동수 부근에서 그 값이 유사한 것으로 나타나 있다. 그러므로 임의의 진동을 시간이력에 대해 측정된 진동으로 구조물의 변위응답스펙트럼을 결정된 후 앞에서 설명한 바와 같이 저진동수 영역에서는 변위응답을 그대로 사용하고, 주진동수 영역에서는 유사속도응답을, 고진동수 영역에서는 유사가속도응답을 구조물의 응답스펙트럼으로 이용한다.

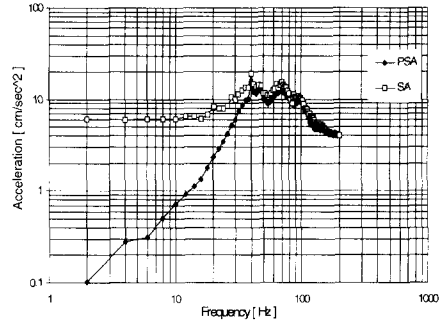


그림 6 응답스펙트럼(SA)과 유사응답스펙트럼(PSA)의 비교(가속도)

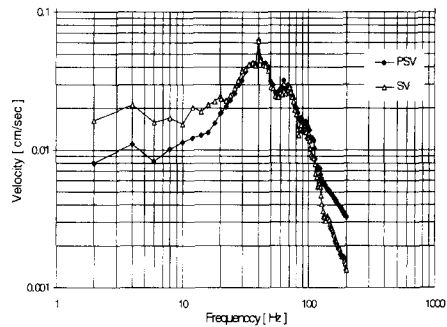


그림 7 응답스펙트럼(SV)과 유사응답스펙트럼(PSV)의 비교(속도)

## 4. 증폭계수의 산정

### 4.1 주진동수의 결정

구조물의 기초에서 진동을 측정하여 분석한 결과 어느 특정한 대역의 진동수가 나타나는데 이러한 측정결과를 1/3 옥타브 분석을 통하여 주진동수의 대역을 결정한다. 현장 1과 현장 2에서 지반진동원으로 생각하는 지하철 터널내부의 슬래브에서는 200Hz~300Hz부근에서 Amplitude가 절정을 이루는 것으로 나타났으며(그림 1), 지상에서의 측정된 결과는 40Hz~60Hz 부근에서 절정을 이루는 것으로 나타났다(그림 2). 현장 3과 현장 4에서 구조물의 내부기초에서의 측정치를, 1/3옥타브 분석하면 40~60Hz에서 가장 큰 값을 나타내는데 (그림 4, 그림 5) 이것은 지상에서 측정된 현장 1과 현장 2와 유사하며 외국의 측정치와도 유사한 것으로 나타났다.<sup>(4),(6)</sup> 증폭계수(amplification factor) 산정시 하나의 최대값만 필요하므로 증폭계수를 결정할 때 유사 가속도 응답에 대한 평균스펙트럼은 주진동수의 두배이상의 진동수들만을 고려하며, 유사 변위 응답 스펙트럼의 경우 주진동수의 1/4이하에만 적용하여 변위 증폭계수를 결정한다. 이를 결정하기 위하여 전체 주파수 대역은 0Hz~200Hz로 하였으며, 고유진동수의 변화는 0.25Hz에 대하여 실시하였다.

### 4.2 증폭계수와 응답 스펙트럼

어떤 거리에서 측정된 진동을 이용하여 구조물의 응답을 예측하기 위하여 사용되는 Newmark과 Hall의 응답스펙트럼 해석법은 지반에서 측정된 최대 응답에 증폭계수를 곱하여 지반진동을 증폭하는 방법으로 직선화된 응답스펙트럼을 만들게 되는데 이 증폭계수는 다음 식과 같이 결정된다.

$$A_u = \frac{X_{max}}{X_g} \quad (1)$$

$$A_v = \frac{\omega X_{max}}{\ddot{X}_g} \quad (2)$$

$$A_a = \frac{\omega^2 X_{max}}{\ddot{\ddot{X}}_g} \quad (3)$$

여기서,  $X_{max}$ ,  $\omega X_{max}$ ,  $\omega^2 X_{max}$ 는 각각 변위응답스펙트럼, 유사속도응답스펙트럼, 유사가속도응답스펙트럼

이고  $X_g$ ,  $\dot{X}_g$ ,  $\ddot{X}_g$ 는 지반의 최대응답이다.

이렇게 결정된 증폭계수를 지반에서 측정된 지반 응답에 곱하여 구조물의 응답을 예측할 수 있다.

현장 1, 2에서의 거리별 측정치에 대한 증폭계수를 구한 결과 거리에 따른 증폭계수의 변화는 별로 없는 것으로 나타났다.<sup>(9)</sup>

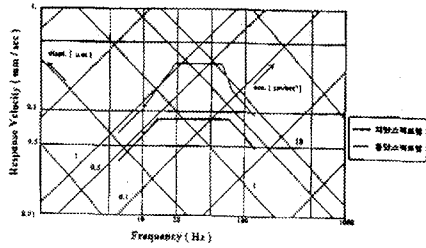
표 1은 감쇠비에 따른 현장 1~4에서의 평균 증폭계수를 나타내고 있으며 그림 8은 현장 1, 2에서의 지반스펙트럼과 증폭계수를 이용하여 구한 응답 스펙트럼을 보여주고 있다.

표 1 감쇠비에 따른 평균 증폭계수

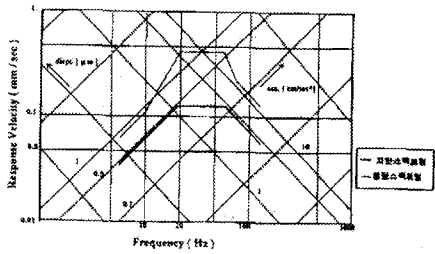
감쇠비	3%			5%			10%		
	Aa	Av	Au	Aa	Av	Au	Aa	Av	Au
현장 1	3.04	3.14	1.90	2.83	2.61	1.73	2.64	2.00	1.70
현장 2	3.00	3.02	2.19	2.82	2.54	2.03	2.62	1.95	1.83
현장 3	3.29	3.30	1.36	2.95	2.68	1.22	2.56	1.96	1.03
현장 4	3.53	2.92	1.98	3.13	2.43	1.84	2.69	1.82	1.61

### 4.3 구조물의 부재별 진동특성

현장 3과 4에서 측정된 자료로부터 증폭계수를 산정한 결과 각 부재별 평균 증폭계수를 산정하면 표 2와 같다. 표에서 보는 바와 같이 구조물의 이차 부재인 슬래브와 벽체에서의 평균증폭계수가 주부재인 보나 기둥보다 평균 2배 정도이다. 감쇠비에 따른 평균증폭계수를 적용한 지반응답스펙트럼을 증폭한 결과에 구조물의 각 부재별 스펙트럼을 도시한 결과는 그림 9에 나타나 있다.

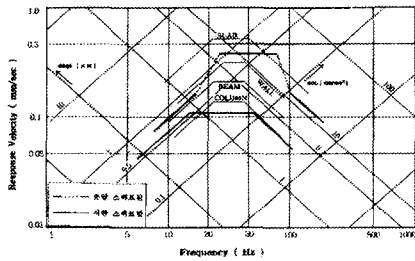


(a) 현장 1

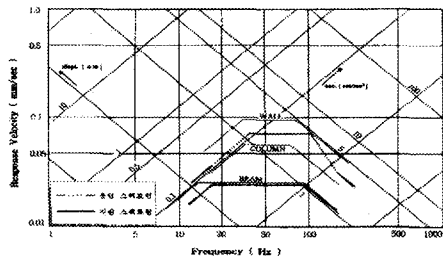


(b) 현장 2

그림 8 현장 1,2에서의 지반스펙트럼과 응답 스펙트럼



(a) 현장 3



(b) 현장 4

그림 9 현장 3, 4에서의 부재별 응답스펙트럼

표 2 구조물 부재별 평균 증폭계수

현장 3	기둥	Aa	1.0
		Av	1.15
		Au	1.17
	보	Aa	1.40
		Av	2.04
		Au	1.36
슬래브	Aa	5.32	
	Av	4.56	
	Au	3.54	
벽체	Aa	2.51	
	Av	2.53	
	Au	1.55	
현장 4	기둥	Aa	2.24
		Av	2.45
		Au	2.31
	보	Aa	1.00
		Av	1.10
		Au	1.43
	벽체	Aa	4.25
		Av	3.75
		Au	3.10

## 5. 결론

본 연구는 현장에서 측정한 지하철 진동 Data를 분석하여 물리량의 감쇠 특성을 파악하고 Newmark과 Hall이 제시한 증폭계수의 개념을 도입한 응답스펙트럼을 지하철의 진동에 적용하여 구조물의 응답예측 기법을 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 지하철의 진동피해를 예측하기 위하여 증폭계수를 이용한 응답스펙트럼 기법을 이용하면 지하철 진동에 대한 구조물의 응답을 쉽게 실용적으로 예측할 수 있다.
2. 응답스펙트럼의 증폭계수의 산정 결과 현장에서 측정한 증폭계수는 감쇠비와 관계없이 가속도 증폭계수의 경우 2.5~3.5 정도이며 속도 증폭계수는 1.8~3.3이고 변위 증폭계수는 1.0~2.2의 분포를 보이고 있다.

부재별 증폭계수는 벽체나 슬래브의 증폭계수가 기둥이나 보 보다 더 큰 값을 나타낸다.

향후 구조물의 피해를 예측하고 진동기준을 제시 하기 위해서는 다양한 진동원에서의 계측이 수행되어야 하며 균열경계스펙트럼등 구조물 피해의 기준이 되는 스펙트럼이 작성되어야 한다.

### 감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 연구지원과제 (94-0600-05-01-3)의 결과임을 밝히며 이에 심심한 사의를 표합니다.

### 참 고 문 헌

1. Clough, R. W., and Penzien, J., *Dynamic of Structures*, McGraw-Hill, 1993, pp. 18-62.
2. Dowding, C. H., *Blast Vibration Monitoring and Control*, 1984, pp. 52-100.
3. Humar, J. L., *Dynamic of Structures*, Prentice-Hall, 1990, pp. 361-383.
4. Kurzweil, L. G., "Ground-borne Noise and Vibration from Underground Rail systems," *Journal of Sound and Vibration*, 66(3), 1979, pp. 363-370.
5. Newmark, N. M., and Hall, W. J., *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake engineering research institute, 1982.
6. Paz, M., *Structure Dynamics: Theory and Computation*, 3rd, Van Nostrand Reinhold, 1991, pp. 170-192.
7. Volberg, G., "Propagation of Ground Vibrations Near Railway Tracks," *Journal of Sound and Vibration*, 87(2), 1983, pp. 371-376.
8. 윤종오, "지반진동에 대한 구조물의 응답특성에 관한 연구", 석사학위 논문, 경희대학교, 1995.
9. 김덕중, "지하철 진동에 의한 구조물의 동적특성에 관한 연구", 석사학위 논문, 경희대학교, 1996.