

철도 강화노반두께 산정방법에 관한 설계기준 비교

A Comparative Study on the Design Criteria for Calculation Method of the Reinforced Roadbed Thickness

최찬용*
Chan-Yong Choi,

박창우**
Chang-Woo Park,

김성수***
Sung-Soo Kim

ABSTRACT

The purpose of a railway track is to provide a smooth surface for safe and economical train transportation. The performance of the track results form a complex interaction of the track and subgrade components in response to train loading and environmental actions. In the past, the role of subgrade as the track foundation were not recognized adequately. There are insufficient information and inadequate methods for subgrade design, assessment and improvement. This situation has survived for a long time largely because a subgrade defect can often be adjusted by adding more ballast under the ties or applying more frequent track maintenance. Therefore, the application of reinforced roadbed technology will be expected to increase in the future. This paper introduces the railroad operation and the method for the determination of reinforced roadbed thickness.

keywords : Reinforced Roadbed, Roadbed thickness, subgrade, Design Criteria

1. 서론

고속철도의 개통과 함께 도입된 강화노반은 열차의 주행 안정성 확보와 궤도 상부로부터 전달된 하중을 하부 지반으로 적절히 분산하는 것이다. 또한, 강화노반은 도상부의 자갈이 상부노반으로 관입됨으로써 발생하는 궤도틀림을 감소시키고 도상표면의 침투수가 상부노반으로 유입하는 것을 차단하는 기능이 있어서 분니발생 억제효과도 있다. 따라서 이러한 이유로 노반재는 적절한 탄성을 가져야 하며 상부노반의 내압강도 이하로 하중을 분산·전달하는 기능을 포함하여야 한다.

이러한 강화노반의 개념이 국내 설계 기준서에 처음 등장된 것은 일반철도의 경우 철도설계기준(노반편, 2001)에 도입되었으며, 고속철도의 경우에는 일반철도보다 빠른 1997년 공사시방서가 제정되어 고속철도건설 공사시방기준으로 이용되었으며, 이후 2003년에 고속철도전문시방서가 개정되었다.

국내 설계기준서에 제시된 일반철도와 고속철도 강화노반두께 산정하는 방법은 서로 상이한 방법으로 노반두께를 구하고 있는데 국내 철도환경을 충분히 고려하지 않고 외국자료를 그대로 모방하는 수준의 두께로 설계되고 있다. 물론 강화노반두께를 안전측으로 설계하기 위해서는 강화노반두께를 증가시키는 것이 바람직하나, 비합리적이며 경제적인 설계를 위해서는 열차의 주행 안정성과 승차감 등 최적의 두께를 결정할 필요가 있다. 본 논문에서는 강화노반두께를 산정하는 국내외 자료를 바탕으로 국내 강화노반두께 산정시 고려되어야 하는 문제점을 분석하여 강화노반두께 산정시 고려 방법 등에 대하여 검토하였다.

*: 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI.

** : 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 연구원, Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI.

***: 건설교통부 기반시설본부 사무관, Deputy Director, Headquarters for Infrastructure, MOCT

2. 국내외 철도강화노반 두께 산정방법

2.1 국내철도 강화노반두께

일반철도와 고속철도 설계기준서에 제시하고 있는 강화노반두께는 그림 1과 같다. 일반철도 강화노반 두께는 상부노반의 지반반력계수(k_{30})조건에 따라 이음매레일과 장대레일로 구분하여 강화노반두께를 결정하고 있으며, 여기서 지반반력계수는 평판재하시험방법(Plate Loading Test)에 의해 침하량이 1.25mm 일때의 하중강도 크기로 구한다. 일반철도의 경우 상부노반조건에 따라서 강화노반의 두께를 20~80cm의 범위로 설계되고 있다. 강화노반재료는 쇄석 또는 고로슬래그쇄석과 수경성 입도조정고로슬래그쇄석을 사용하고 있다.

고속철도의 경우에는 일반철도와 동일하게 상부노반조건(k_{30})에 따라 강화노반두께를 구분하고 있는데, 일반철도와 달리 강화노반층을 보조도상층과 입도조정층으로 구분하여 설계하고 있다. 그림 1에서와 같이 고속철도의 강화노반두께는 50~95cm로 보조도상층은 20cm로 동일하게 하고, 입도조정층을 상부노반 조건에 따라 다르게 적용하여 노반두께를 규정하고 있다.(표 1, 2 참조)

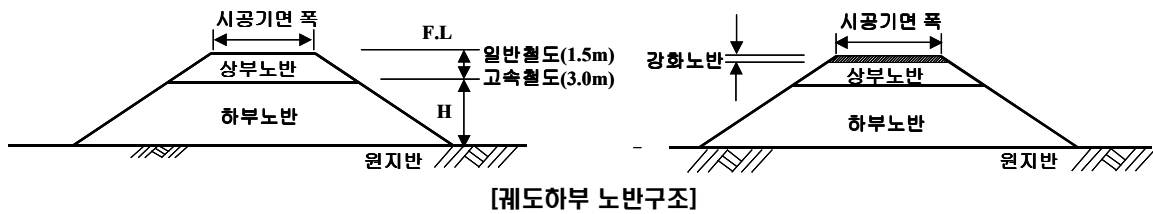


그림 1. 국내 설계기준서에서 제시하고 있는 강화노반두께

표 1. 일반철도 노반두께

상부노반조건	쇄석 또는 고로슬래그쇄석	배수층	수경성 입도조정 고로슬래그 쇄석	배수층
흙쌓기 $K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$	20/35	0	15/25	0
흙쌓기 $7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	35/65	0	25/50	0
땅까기, 평지 $K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$	20/35	15	15/25	15
땅까기, 평지 $7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	35/65	15	25/50	15

주) 철도설계기준, 2004 참조

표 2. 고속철도 노반두께

강화노반(cm)		계
보조도상	입도조정층	
20	30	50
20	60	80
20(20)	45(15-25)	65(35-45)
20	75	98

주) ()은 암반구간에서의 강화노반두께
(고속철도전문시방서, 2005) 참조

표 3은 고속철도에서 사용하고 있는 강화노반재료의 품질기준을 나타내었다. 표 3에서와 같이 강화노반재료의 품질기준은 보조도상층과 입도조정층으로 구분되며, 최대입경의 차이에 의해 구분되기도 한다.

표 3. 고속철도 강화노반재료의 품질기준(고속철도전문시방서, 2005)

구분	보조도상층	입도조정층	비고
경도 및 내구성	40이하	60이하	
편평도	30이하	30이하	
모래당량	ES>40	ES>40	
최대입경(mm)	31.5 이하	125 이하	

이상과 같이 강화노반두께는 고속철도와 일반철도 모두 평판재하시험(PBT)에 의한 상부노반 조건의 지반반력계수(K_{30})에 따라 획일적으로 노반두께를 규정하고 있어, 열차속도(V), 열차통과톤수(N), 열차 축하중(P) 등을 고려치 못한 방법으로 설계되어지기 때문에 노반두께가 과대·과소평가되는 경우가 발생할 수 있으므로 이에 대한 적절한 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

2.2 일본철도의 강화노반두께

일본의 경우는 일본철도종합기술연구소(RTRI)에서 1992년도에 집필된 “철도구조물등설계표준·동해설” 자료를 활용하여 강화노반두께를 산정하고 있다. 일본에서의 강화노반두께는 궤도구조, 열차 속도, 노상강도 등의 조건을 고려하여 결정하였으며 표 2에 보인 두께를 표준으로 한다. 여기에서 일반철도는 열차속도 160km/h 이하에 대응한 노반 구조로 하고 고속철도의 경우는 열차 속도 270km/h 이하에 대응한 노반 구조로 하였다.

표 4와 표 5에서와 같이 일본의 경우에도 국내와 같이 노상조건에 따라 노반두께를 규정하고 있다. 노반의 각각의 조건에 따라 성토의 경우 20~65cm를 규정하였으며, 절취 및 평지의 경우 배수층을 포함하여 35~80cm로 규정하였다. 국내 강화노반두께와 비교해 볼 때 거의 유사한 두께이다. 그러나 일본의 경우에는 국내에서는 설치하지 않고 있는 아스팔트콘크리트 층 5cm를 포함하고 있어 좀 더 안전측으로 설계되고 있는 것으로 사료된다. 국내 철도에서도 아스팔트콘크리트 층의 유무에 따른 노반두께에 대하여 정량적으로 분석할 필요가 있다.

고속철도의 경우에도 아스팔트콘크리트 층 5cm를 포함하여 노상조건의 지반반력계수(k_{30})에 따라 강화노반두께를 규정하고 있다. 고속철도의 강화노반두께는 일반철도의 이음매 조건과 유사하며, 지반반력계수의 범위가 $7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$ 인 경우 일반철도 이음매 조건보다 5cm를 더 포설하도록 규정하고 있다.

표 4. 일반철도 강화노반두께(장대레일/이음레일)

종 별	재료 (단위)	쇄 석 노 반			슬 래 그 노 반	
		아스팔트 콘크리트 (cm)	입도조정 쇄석또는고로 슬래그쇄석 (cm)	배수층 (모래 등) (cm)	수경성입도 조정고로 슬래그쇄석 (cm)	배수층 (모래 등) (cm)
성토	$K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$	5/(5)	15/(30)	0/(0)	15/(25)	0/(0)
성토	$7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	5/(5)	30/(60)	0/(0)	25/(50)	0/(0)
평지·절취	$K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$	5/(5)	15/(30)	15/(15)	15/(25)	15/(15)
평지·절취	$7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	5/(5)	30/(60)	15/(15)	25/(50)	15/(15)

주: () 이음매레일의 경우 강화노반 노반두께

표 5. 고속철도 강화노반두께

종 별	재료 (단위)	쇄 석 노 반			슬 래 그 노 반	
		아스팔트 콘크리트 (cm)	입도조정 쇄석또는고로 슬래그쇄석 (cm)	배수층 (모래 등) (cm)	수경성입도 조정고로 슬래그쇄석 (cm)	배수층 (모래 등) (cm)
성토	$K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$	5	30	0	25	0
성토	$7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	5	65	0	50	0
평지·절취	$K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$	5	30	15	25	15
평지·절취	$7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	5	65	15	50	15

2.3 미국철도의 강화노반두께

미국의 철도노반에 대한 설계기준은 미국철도협회(America Railway Engineering Association, AREA)에서 규정하고 있다. AREA는 총 4권으로 구성되어 있으며 1권은 궤도분야, 2권 구조물분야, 3권 사회기반시설과 승객, 4권 시스템관리로 구성되어 있다. 노반분야는 제 1권 Track부분으로 Chapter 1

Roadway and Ballast 부분을 참고하였다.

미국의 강화노반두께는 자갈층으로 정의하고 있으며, 자갈층에는 도상자갈층과 보조도상층을 모두 포함한 두께를 말한다. 즉, 국내와 일본의 강화노반층인 보조도상층과 동일하다. 미국 철도협회(AREA)에 따르면 자갈층을 구하는 공식 중에서 가장 많이 사용하고 있는 공식은 Talbot's 방정식으로 식(1)과 같다. 그러나 Talbot's의 방정식은 경험적인 실험공식으로 1910년대에서 1920년대에 주로 사용된 공식이며, 현재의 열차속도, 열차축하중 등 궤도조건을 고려하기에는 무리가 있는 간편 공식이다. 또한, 상부노반의 토질조건, 열차의 동적하중, 자갈층의 조건 등이 전혀 반영되지 않아 정확도가 떨어지는 방법이다.

$$P_c = \frac{16.8P_m}{h^{1.25}} \quad : \text{Talbot의 경험식} \quad (1)$$

여기서,

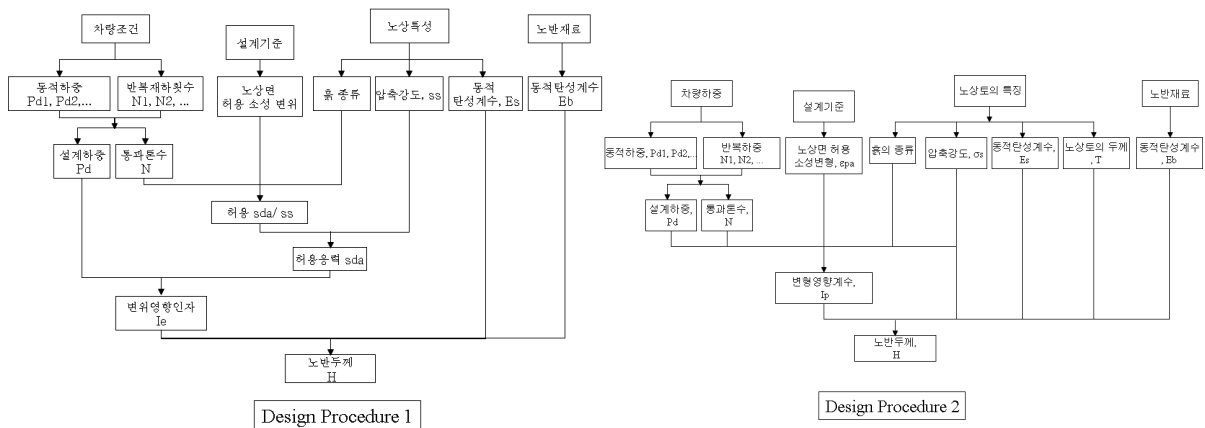
P_c : 철도하중에 의해 노반에 작용되는 응력 또는 노반의 허용지지력(psi), 미국철도협회 권장치는 25psi

P_m : 철도하중에 의해 침목 저면 혹은 노반 상부에 작용되는 등분포 응력(psi)

h : 침목저면에서 노반상부까지의 도상두께(in), 식(2)에서는(cm)

이후 Raymond(1985)는 Talbot's 공식에서 제안하고 있는 상부노반의 허용압력을 Casagrande의 토질분류법을 이용, 다양한 노상의 압력을 가정하여 설계에 반영하였다. 그러나 이 방법도 열차속도, 열차통과톤수 등 철도환경을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다.

그림 2(a, b)는 Selig and Water(a, 1994)와 Li and Selig(b, 1995)에 의해 제시된 설계 개념도로서 노상토의 강도 및 설계교통량을 포함하여 노상토가 파괴될 수 있는 경우와 노상토의 총 소성변형의 한계의 경우 두 조건을 모두 검토하여 노반두께가 더 크게 나온 경우에 대하여 최종적으로 노반두께를 선택하도록 되어져 있다. 이러한 방법은 국내 철도에서 적용하고 있는 방법보다는 더 합리적인 방법인 것으로 판단된다. 국내의 경우, 열차통과톤수에 대한 적절한 평가가 이루어지고 있지 않고 노상의 지지력 조건에 따라 획일적으로 적용하고 있는 것을 알 수 있다.



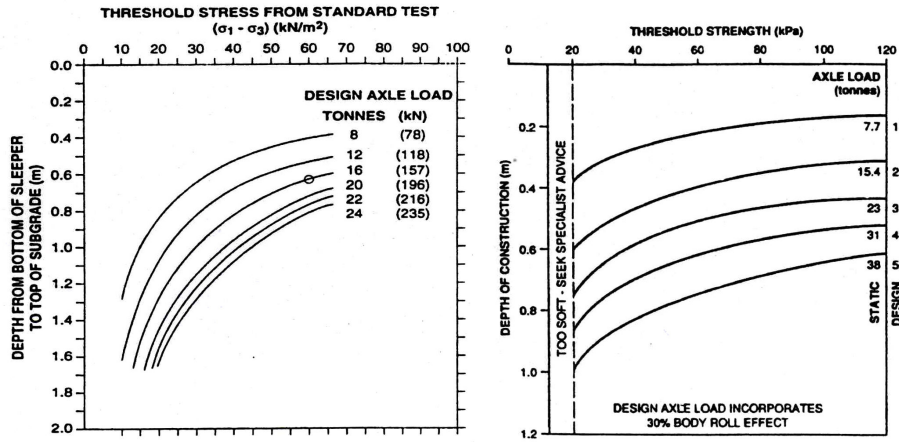
(a) 노상토의 파괴 가능성 검토 (b) 노상토의 총 누적소성침하량 한계 검토

그림 2. 노반두께 결정하기위한 설계 개념도

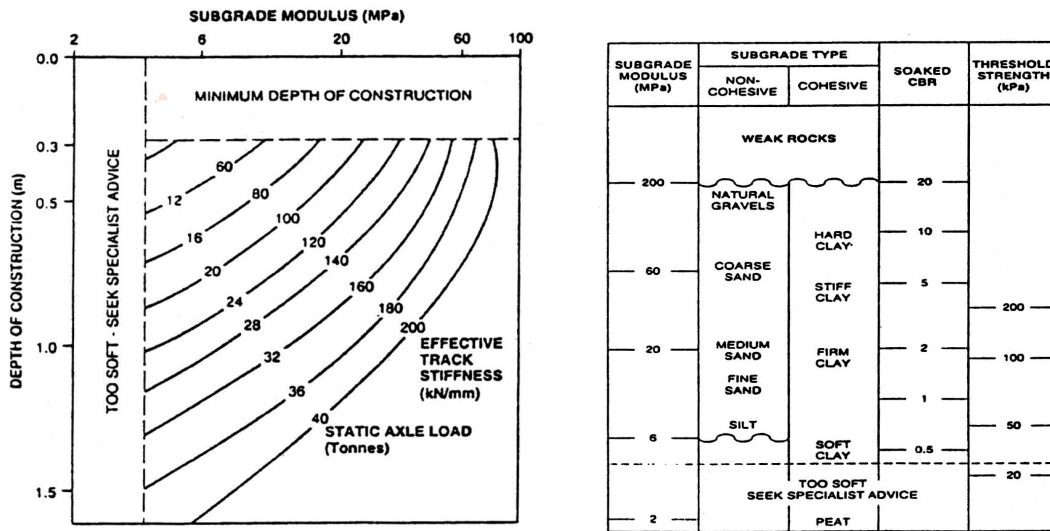
2.4 영국철도의 강화노반두께

영국철도에서의 도상두께를 결정하는 방법은 점토노반을 기준으로 개발되었으므로 압축성이 큰 노반에서 현실적인 방법이다. 실험에서 구한 노반토의 강도를 사용함으로써 노반의 공학적 특성을 반영한 설계가 가능하다. 그러나 이러한 장점은 압축성이 작은 실트나 모래, 자갈 등의 조립토로 구성된 노반에 적용했을 때는 과다하게 설계되는 경우가 종종 있으며 경우에 따라서는 많은 양의 실내시험이 필요해 단점으로 지적된다(Raymond, 1978).

영국철도의 설계법은 노반 흙의 변형과 반복하중과의 상관관계를 구하고 여기서 반복하중에 대한 뚜렷하게 다른 변형특성을 보이는 경계에서 흙의 강도를 정의한 임계응력(threshold stress)개념을 도입하였다. 이를 바탕으로 실험으로 구한 흙의 강도와 설계축하중을 구하면 도상두께를 구하는 설계도표를 제시하였다(그림 3, 그림 4 참조).



(a) 도상두께 결정을 위한 설계도표 (b) 노반강도를 기준한 도상의 두께 결정
그림 3. 영국철도에서 사용하는 도상두께 결정 설계도표(Selig & Waters, 1994)



(a) 노반의 탄성계수(subgrade modulus)를 기준한 도상의 두께 결정 (b) 노반강도계수간의 상관관계 (Selig & Waters, 1994)

그림 4. 영국철도에서 사용하는 도상두께 결정 방법 및 상관관계

3. 결론

본 논문에서는 각 국에서 사용 중인 설계기준서를 바탕으로 강화노반두께 산정하는 방법에 대하여 검토하였다. 현재 국내에서 사용되고 있는 노반두께 산정방법과 국외 기준과의 비교검토를 통해 국내 노반두께의 문제점과 개선방안을 제시한 결과는 다음과 같다.

1. 국내의 설계기준을 검토한 결과, 국내 강화노반두께 산정방법은 일본 설계기준을 바탕으로 제시된 기준으로서 일본설계기준의 많은 부분이 설계에 반영되었다. 그러나 국내 강화노반층에는 아스팔트콘크리트 층의 두께가 포함되지 않고 있으며 일본 기준에는 아스팔트콘크리트 층 두께가 포함되어져 있어 국내 기준보다 엄격하게 노반을 관리하고 있는 것으로 사료된다. 이러한 아스팔트콘크리트 층에 의해

강화노반 및 상부노반에 빗물이 침투되어 노반이 연약화되는 현상을 원칙적으로 차단하고 있다. 그러나 국내 철도에서 사용되고 있는 기준에는 이러한 아스팔트콘크리트 층에 대한 면밀한 검토가 이루어지지 않고 있어 이에 대한 적극적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

2. 철도 선진국의 노반두께 산정을 위한 연구동향을 살펴보면, 일률적인 노반두께에서 경제적이며 합리적인 노반두께 산정을 위한 설계도표 등을 개발하여 설계에 반영하고 있다. 미국의 경우 노상토의 지지력 조건, 열차속도, 열차통과톤수, 자갈층의 동적물성값 등 노반두께에 필요한 여러 가지 인자에 대하여 정량적으로 평가하여 보다 경제적이며, 내구성이 우수한 노반두께를 산정하고 있는 실정이다.
3. 국내 강화노반 두께의 경우에도 철도선진국에서 제시하고 있는 기준들에 대하여 보다 면밀한 검토를 한 후, 국내실정에 적합한 경제적이며, 합리적인 노반두께 산정기술이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 철도설계기준(2004), 한국철도시설공단
2. 고속전철사업기획단, 고속철도 흙구조물 설계표준시방서 해설(안), 1991
3. 한국고속철도건설공단, 고속철도 노반공사 공사 시방서, 1997
4. 한국고속철도건설공단, 고속철도 전문시방서(노반편), 2003
5. 최신철도선로, 서사범 역, 열과 알, 2001
6. 한국철도기술연구원, "철도노반관리기준 및 개선방안", 2005
7. AREMA, Manual for Railway Engineering, Vol. 1 Track, 2005
8. Li, D. and Selig, E.T.(1995), "Evaluation and Remediation of Potential Railway Subgrade Problems under Repeated Heavy Axles Loads", Rep. No. R-884, Assoc. of Am. Railroad, Transp. Technol. Ctr., Pueblo Colorado.
9. Li, D.(1994), "Railway Track Granular Layer Thickness Design Based on Subgrade Performance under Repeated Loading", Ph. D Dissertation, Univ. of Massachusetts.
10. Li, D. and Selig, E.T.(1998a), "Method of Railroad Track Foundation Design I: Development", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 316-322.
11. Li, D. and Selig, E.T.(1998a), "Method of Railroad Track Foundation Design II: Applications", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 323-329.
12. Raymond, G.P.(1978),"Design for Railroad Ballast and Subgrade Support", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT1, pp. 45-60.
13. 運輸省 鐵道局, "鐵道構造物等設計標準・同解説 土構造物", 鐵道總合技術研究所, 1992. 10.
14. 須長誠, 關根悅夫, "鐵道強化路盤厚さの低減に関する研究", 土木學會論文集 No. 498/VI-24, pp. 57~66, 1994.9.
15. 佐藤吉彦, 梅原利之, "線路工學", 日本鐵道施設協會, 1995. 3. 20.
16. 須田征男, 長間 彰, 徳岡研三, 三浦 重, "新しい線路- 軌道の構造と管理 -", 社團法人 日本鐵道施設協會, 1997. 7.
17. 關根悅夫, 村本勝巳, "營業線 路盤の支持力特性に関する研究", RTRI REPORT, Vol. 9, No. 7, '95. 7, pp 19~24.