

마이크로터널링으로 인한 활주로 기층의 전단 강성의 변화 :크로스홀 시험과 SASW 실험에 의한 평가

Evaluation of Subgrade Stiffness after Microtunnelling Operations at JFK
Airport by Crosshole and SASW Tests

조 성 호*
Joh. Sung - Ho

ABSTRACT

Microtunnelling is a technique applied to install a small-size tunnel in a soft cohesionless ground. In microtunnelling, a series of concrete tubular segments are pushed from a starting pit to a receiver pit by hydraulic pressure. The microtunnelling technique was introduced to install a power-line tunnel under a runway of JFK international airport at New York. During the microtunneling process, bentonite is jetted with very high pressure through a nozzle to advance concrete segments, and, therefore, it may disturb the ground above the tunnel. In this study, seismic methods such as crosshole testing and SASW measurements were used to evaluate disturbance in the subgrade caused by the pressurized bentonite in the aspects of subgrade stiffness. SASW measurements were performed on the runway above the center line of the microtunneling, and crosshole testings were done at the nearby boreholes for the evaluation of shear wave velocity profiles.

Besides the change of subgrade stiffness, the change of subgrade strength was also evaluated by the site-specific relationships between shear wave velocity and N value, which was determined by using the shear wave velocities and N values measured at the boreholes of JFK airport. The site-specific relationships were used to translate the shear wave velocities of the disturbed materials to N values. The estimated N values gave a clue to the understanding of the change of subgrade strength.

요 지

마이크로터널링은 비교적 연약한 사질토 지반을 통과하는 소규모의 터널을 시공할 때 적용하는 공법으로, 터널 시작 위치에서 일련의 짧은 원형 콘크리트 관을 유압으로 밀어서 전구간을 관통하는 공법이다. 미국 뉴욕의 JFK공항의 활주로에서는 활주로 하부를 통과하는 전력구의 설

* 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 전임강사

치를 위하여 이러한 마이크로터널링 공법을 시도하였다. 마이크로터널링 공법에서는 콘크리트관을 전진시키기 위해 강력한 유압으로 벤토나이트를 분출하는데, 이로 인하여 활주로 하부의 지반이 교란될 가능성이 있었기에 본 연구에서는 터널시공으로 인한 교란의 정도를 평가하기 위하여 SASW 기법과 크로스홀 시험을 수행하였다. 구조물 비파괴 진단도 기법인 SASW 기법으로는 활주로 기층 부위의 지반강성 변화 정도를 평가하였고, 크로스홀 시험으로는 활주로 인접 지반의 깊이별 S파 속도 변화를 조사하였다. 또한, JFK 공항 부지에서 결정한 S파 속도-N 치의 부지특유 관계식을 통하여 S파 속도를 N 치로 변환함으로써 지반강성의 변화를 지반강도 변화의 측면으로도 지반교란의 정도를 파악하였다.

Keywords : Crosshole testing, SASW method, Shear wave velocity, SPT N-values, Structural integrity testing

1. 서 론

미국 국제공항의 하나인 뉴욕 JFK 공항에서는 기존의 주 활주로 아래로 전력구를 시공할 필요가 있었다. 전력구가 활주로 아래를 통과하였기에 전력구의 설치를 위해서는 활주로의 부분적 철거를 요하는 터파기를 하거나 또는 활주로의 철거없이 그 아래로 터널을 굴착하여야 했다. JFK 공항은 24시간 계속 운영이 되는 허브공항이기에 전력구 설치를 위한 주 활주로의 철거는 상당한 경제적 피해의 초래와 항공교통 흐름의 장애를 초래하게 되어, 활주로 철거에 의한 전력구 설치의 합리적이지 못한 선택이었다. 그리하여, JFK 공항의 활주로에서는 마이크로터널링이라는 공법으로 전력구를 시공하였다.

마이크로터널링은 여러 개의 짧은 길이의 원형 콘크리트 관을 한쪽에서 유압으로 밀어서 전구간을 관통하는 공법으로 강성이 작은 사질 토 지반에 주로 사용된다. 마이크로터널링은 콘크리트 관을 추진시키기 위해서 높은 압력으로 벤토나이트를 주입하게 되는데 이로 인해 지반이 교란될 가능성이 있어서, JFK 공항의 활주로에서도 마이크로터널링으로 인한 활주로 기층의 교란 정도를 평가할 필요가 있었다.

본 연구에서는 이러한 마이크로터널링으로 인하여 활주로 기층의 전단강도 또는 전단강성이 저하되었는지를 평가하기 위하여 마이크로

터널링 전후에 크로스홀 시험과 SASW(Spectral Analysis-of-Surface-Waves : Heisey et al., 1982 ; Joh, 1996) 실험을 수행하였다. 마이크로터널링 이전의 지반을 조사하기 위한 실험은 1993년 7월 12일~15일에 수행되었으며, 마이크로터널링 후의 지반 변화를 평가하는 실험은 마이크로터널링이 거의 종료된 동년 8월 9일~13일에 수행되었다.

이와같이 본 연구에서는 크로스홀 시험과 SASW 실험에 의해서 활주로 기층과 인접지반의 마이크로터널링으로 인한 전단강성의 변화를 평가하고자 하였고, 또한, JFK 공항 활주로의 S파 속도-N치의 부지특유의 관계식을 구하여 지반강성의 변화를 지반강도의 변화로 이해하여 지반교란의 정도를 평가하고자 하였다.

2. 크로스홀 시험과 SASW 실험의 개요

2.1 크로스홀 시험

크로스홀 시험은 시추공에서 깊이에 따라 P파와 S파의 속도를 측정하는 원위치 시험으로서 한 시추공 내에 있는 발전원에서 발생이 된 체적파(P파 또는 S파)가 일정 거리만큼 떨어져 있는 다른 시추공 내의 감진기까지 전파되는 시간을 측정함으로써 체적파의 전파속도를 측정하는 방법이다. 전형적인 크로스홀 시험에

사용되는 장비구성은 그림 1에 보인 바와 같으며, 실험에 사용된 발진원(일명 Mok source)은 SV파, P파를 발생시킬 수 있는 쉘기 형태로서 미국 텍사스 대학의 Stokoe 교수와 경희대의 목영진 교수에 의해서 개발된 것인데, 단순하고 간편하면서도 매우 양호한 체적파를 발생시키는 효과적인 발진원이다. 또한, 발진원에 의해서 발생된 SV파와 P파를 감지하기 위해서 사용한 감진기로는 미국 Mark Products사의 제품인 4.5Hz 속도계(geophone)로서, 어뢰 모양의 밀폐된 용기 내에 3개의 속도계가 3방향(SV, SH, P파 전파방향)으로 설치되어 있어서 3방향의 진동을 동시에 또는 교대로 측정 가능하도록 되어 있다.

크로스홀 시험은 활주로 13L-31R 근처에서 모두 두 곳의 위치에서 수행이 되었으며 그림 2에 크로스홀 시험이 수행된 시추공이 도시되어 있다. 각각의 크로스홀 시험을 위해 사용된 시추공은 C9, C10과 C11, C12로 동일 도면에

표시되어 있는데, 각 크로스홀 시험을 위한 두 시추공 사이의 간격은 공히 12ft(3.7 m)로 되어 있다.

활주로 13L-31R 근처에서의 크로스홀 시험은 활주로 하부 약 15ft(4.5m) 심도에서 진행이 된 마이크로터널링에 의한 활주로 하부 지반에 대한 영향을 평가하기 위한 것이기에, 터널공사 이전과 공사 이후에 2회에 걸쳐서 크로스홀 시험을 수행하였다. 크로스홀 시험을 수행한 심도는 지하 2ft(0.6m)에서부터 1ft(0.3m) 간격으로 지하 23ft(6.9 m)까지이다.

2.2 SASW 실험

SASW 기법은 발진원과 두 개의 감진기를 사용하여 지반 및 구조물의 지표면 하부의 깊이별 강성 변화를 추정하는 실험으로서 발진원과 감진기를 모두 지표에 설치하여 수행하는 비파괴 시험이다. SASW 실험에 사용하는 발진원으로는 순간 충격파를 발생시킬 수 있는

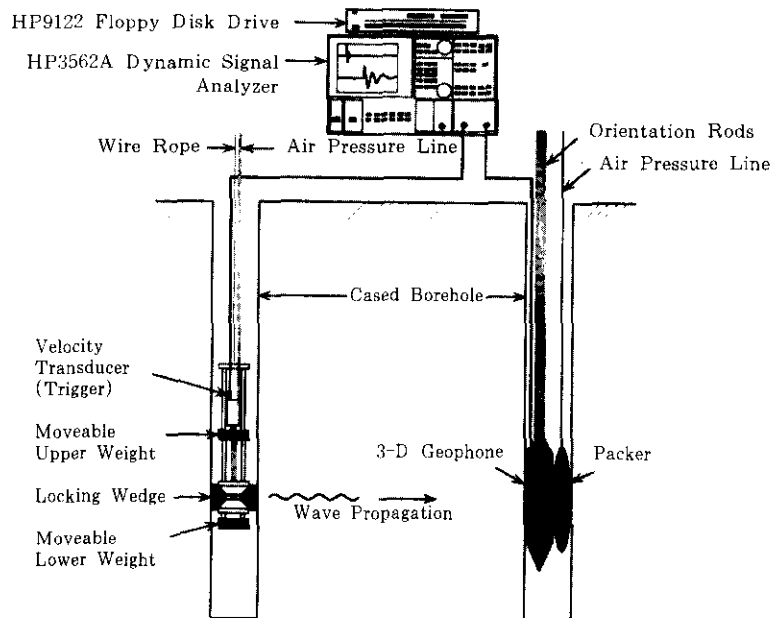


그림 1. Schematic Diagram of Crosshole Seismic Testing

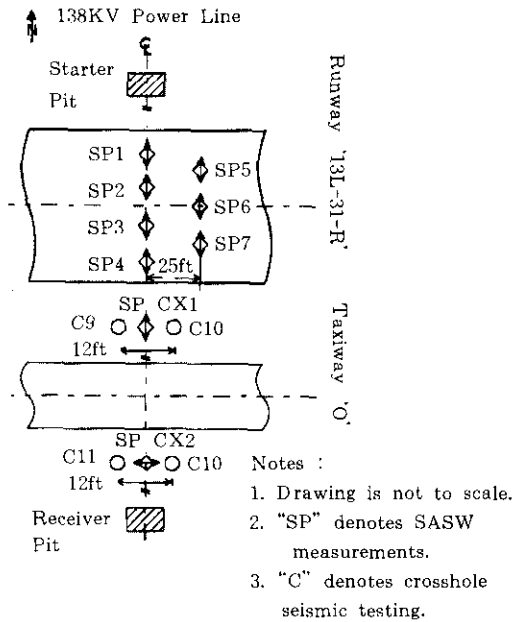


그림 2. Plan View of Locations of Crosshole Seismic Testing and SASW Measurements Associated with Power-Line Tunnel

해머와 같은 도구가 사용이 되는데, 이러한 순간 충격원은 다양한 주파수 성분의 표면파를 발생시키는데 매우 효율적이다. 발진원에 의해서 발생한 표면파를 측정하기 위해서 속도계나 가속도계 같은 감진기를 사용하며, 두 개의 감진기는 발진원과 일렬로 동간격으로 설치된다. 이렇게 두 감진기에 의해서 측정된 표면파 전파에 관한 정보는 두 감진기 사이의 위상각 차이를 결정하는데 활용이 되고, 이 위상각 차이는 일련의 분석과정을 거쳐서 표면파 속도, S파 속도 등으로 변환된다.

SASW 실험을 위한 기본 장비구성은 그림 3에 보인 바와 같으며, 아스팔트 층과 활주로 기층을 조사하기 위하여 사용한 감지기간 거리는 1ft(0.3m), 2ft(0.6m), 4ft(1.2m), 8ft(2.4m), 16(4.8m), 32ft(9.6m) 등이었다. 각 감지기간 거리에 따라서 발진원도 달리 선택하여

사용하였으며, 사용한 발진원으로는 4oz 해머, 고무 팀이 달린 해머, 10lb 슬래지 해머 등이었고, 감진기도 감지기간 거리에 따라 PCB사의 308B02 가속도계, Mark Product사의 4.5Hz 속도계, 1Hz 속도계 등을 적절하게 선택하여 사용하였다. 감진기로 측정된 진동을 기록하고 실시간으로 주파수 해석을 하기 위해서 신호분석기를 이용하였는데, 본 실험에서는 HP사의 3562A를 사용하였다.

JFK 공항 활주로 13R-13L에서는 모두 7개 위치에서 SASW 실험을 수행하였으며, 그중 SP1, SP2, SP3, SP4는 터널의 종방향 중심선과 일치하도록 선정하였고, SP5, SP6, SP7은 터널시공에 의해서 영향을 받지않는 축선으로서 터널 중심선에서의 SASW 실험과 비교하기 위하여 선정하였다.

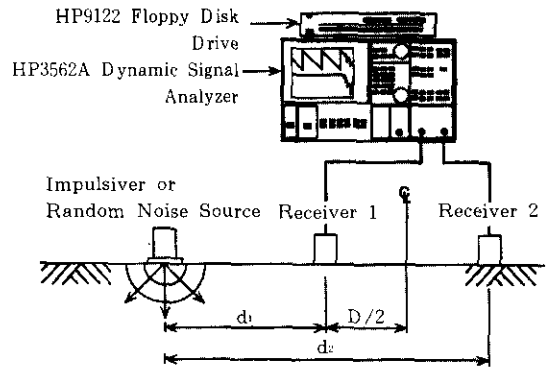


그림 3. Schematic Diagram of SASW Measurements

3. 크로스홀 시험에 의한 활주로 인접 지반의 강성 평가

마이크로터널링 시공 전후에 시추공 C9, C10에서 측정된 크로스홀 시험에 의해 결정된 S파, P파 속도 주상도는 각각 그림 4, 5에 제시된 바와 같으며, 시추공 C11, C12에 대한 S파, P파 속도 주상도는 그림 6, 7와 같다.

그림 4의 시추공 C9, C10에서 측정된 S파에 대한 크로스홀 시험 결과를 살펴보면, 시험이 행해진 부지는 지표면 25ft(7.5m) 까지 약 3개의 지층으로 구성이 되어있는 것을 알 수 있는데, 이러한 지층구조는 터널 시공 이후에도 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉, 터널시공 완료 후에도 전체 지층구조와 각 지층의 S파 속도는 터널시공 전의 경우와 동일함을 알 수 있는데, 이러한 사실은 터널 시공이 활주로 하부 지반의 전단강성에 미친 영향은 무시할 정도라는 것을 의미하는 것이다.

그림 5에는 P파에 대한 C9, C10에서의 크로스홀 시험결과인데, 이 또한 S파 크로스홀 시험결과와 동일하게 터널시공 전과 후의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. P파 속도가 5000 ft/sec(1500m/sec)인 경우는 P파 측정심도에 지하수가 있음을 암시하고 있는데, 이를 참고해보면 터널시공 전이나 후에 지하수위는 변함없이 약 8ft(2.4m)의 심도에 위치하고 있으며, 10ft(3m)와 12ft(3.6m) 사이에서의 약 25% 감소를 제외하고는 전체적으로 P파의 속도에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 터널 시공 후에 10ft(3m)와 12ft(3.6m)사이에서 관측된 S파 속도와 P파 속도를 살펴보면 S파 속도는 약 400ft/sec(120m/sec)이고, P파 속도는 약 2700ft/sec(810m/sec)이다. 만약, 이 심도에서 지하수위가 없고 Poisson 비가 0.333이라면, 400ft/sec(120m/sec)의 S파 속도에 대한 P파 속도는 800ft/sec(240m/sec)가 되어야 하는데, 실제로 측정된 P파 속도는 이보다 훨씬 높은 값이므로, 이 심도에서의 P파 전파는 흙입자를 통해서라기 보다는 흙입자 사이에 존재하는 지하수에 의해서이다. 따라서, 이 심도에서 P파 속도의 감소는 지하수 포화도의 감소를 의미하는 것이지 지반 강성의 감소를 의미하는 것이 아니다.

반면 그림 6에 도시되어 있는 시추공 C11과 C12에서 측정된 S파 속도의 터널시공 전후에 대한 추이를 살펴보면, 심도 10ft(3m)와 12ft(3.6m) 위치에서 약 35% 정도의 S파 속도 감

소를 확인할 수 있는데, 이는 터널시공에 의해서 간극비의 증가나 유효 수평응력의 감소로 인해 이 심도에서의 지반이 약해졌음을 의미한다. 그러나, 지반 강성의 감소는 지반침하와 직결되어 문제가 될 여지가 있지만, 감소된 S파 속도는 시추공 C9, C10 지역의 해당 심도에서 측정된 S파 속도와 동일하기 때문에 오히려 부동침하의 소지가 없어졌으며 침하가 있다고 해도 C9, C10 지역과 동일한 정도가 될 것이어서 시추공 C11, C12 지역에서의 지반 강성의 감소는 문제가 없으리라 사료된다.

시추공 C11, C12 지역에서 측정한 P파 속도는 그림 7에 도시된 바와 같은데, 시추공 C9, C10 지역에서의 경우와 여러 가지 면에서 유사하다. 즉, 지하수위의 위치가 약 7 ft (2.1 m)로 거의 동일하고 10~13ft(0.3~3.9m) 사이의 심도에서는 포화도가 낮으며, 터널시공 후에 10~12ft(0.3~3.6m)의 위치에서 P파 속도가 저하되는 것 등은 시추공 C9, C10 지역에서의와 같이 동일하게 관측되었다.

4. SASW 실험에 의한 평가

4.1 활주로 기층

JFK 공항의 활주로 13L-31R 하부에서 수행된 마이크로터널링 공사의 활주로 기층에 대한 영향을 평가하기 위하여 활주로 위와 크로스홀 시험이 수행이 된 시추공 지역에서 SASW 실험이 비파괴적으로 수행되었는데, 구체적인 SASW 실험 위치는 그림 2에 다이아몬드 기호로 표시한 바와 같다. 활주로 위에서의 SASW 실험은 모두 7개 축선에서 실시되었는데, 이 중 SP1, SP2, SP3, SP4라고 표시되어 있는 4개의 축선은 마이크로터널의 중심선과 일치하며, SP5, SP6, SP7은 터널 중심선에서 25 ft (7.5 m) 떨어져서 터널 중심선과 평행하게 위치해 있다.

터널 상부의 지반 평가를 위한 SASW 실험 SP1~SP4에서의 결과를 분산곡선의 형태로

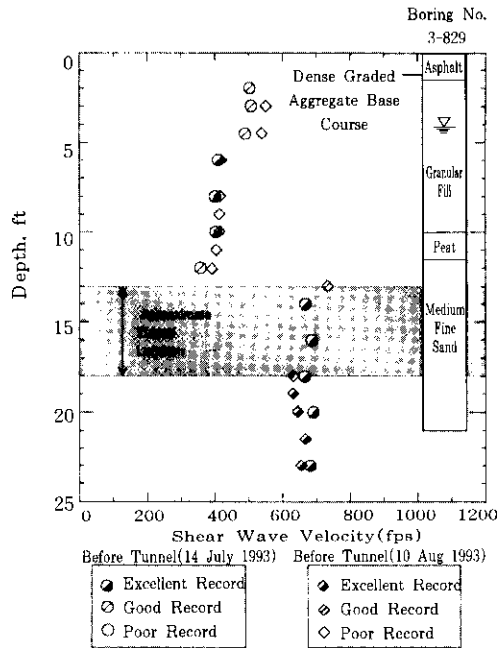


그림 4. Shear Wave Velocity Profiles from Crosshole Tests at JFK Airport Between Boreholes C9 and C10; Before and After Tunneling

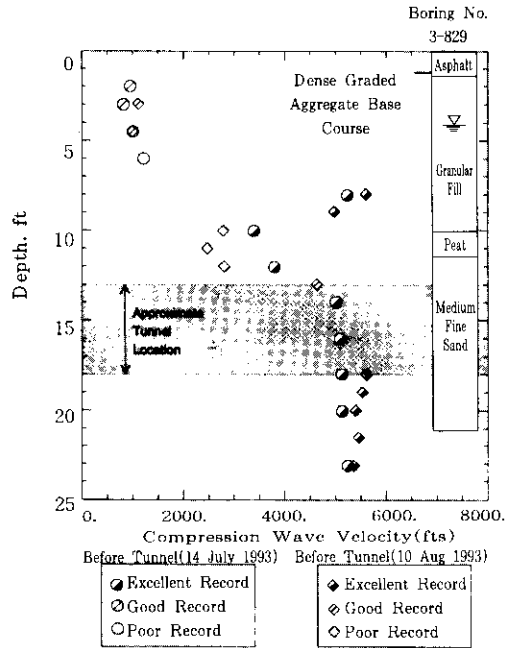


그림 5. Compression Wave Velocity Profiles from Crosshole Tests at JFK Airport Between Boreholes C9 and C10; Before and After Tunneling

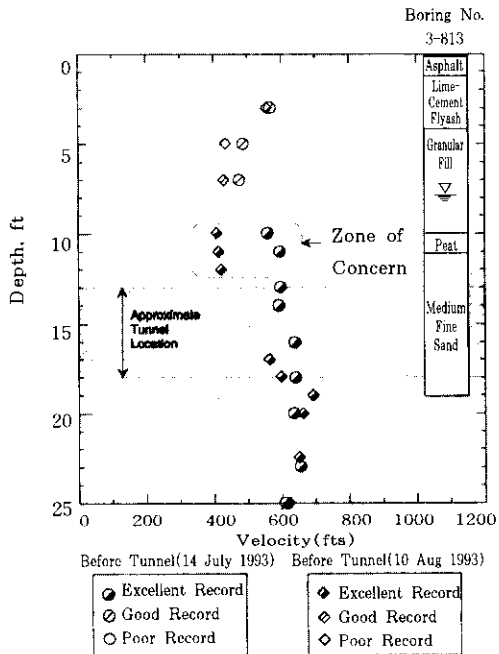


그림 6. Shear Wave Velocity profiles from Crosshole Tests at JFK Airport Between Boreholes C11 and C12; Before and After Tunneling

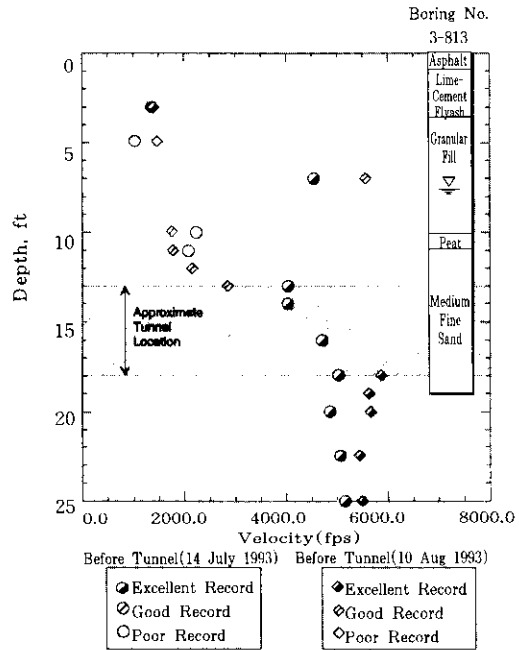


그림 7. Compression Wave Velocity profiles from Crosshole Tests at JFK Airport Between Boreholes C11 and C12; Before and After Tunneling

정리하였을 때 그림 8과 같으며, SP5~SP7에 대한 결과는 그림 9에 도시한 바와 같다. 그림 8과 9의 분산곡선은 강성이 큰 표층이 강성이 작은 층 위에 있을 경우의 대표적인 분산곡선의 형태인데, 이러한 분산곡선은 크게 두 가지의 그룹으로 분리된다. 하나는 표층 및 표층-하부층 천이영역을 포함하는 부분과 다른 하나는 하부 층의 강성을 반영하는 부분이다. 그림 8과 9에 도시된 분산곡선의 경우에 있어서 하부 층에 해당하는 부분은 활주로 기층의 강성이 된다고 할 수 있는데, 실험 위치에 관계없이 하부 층에 대한 분산곡선은 서로 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이는 활주로 기층의 물성이 실험이 수행된 지역 내에서는 거의 균질함을 의미하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 단지 활주로 기층의 강성에만 관심이 있기에 이에 해당하는 부분만 선정하여 분석하였다.

그림 10과 11에 활주로 기층에서의 마이크로터널링 전후에 해당하는 분산곡선만을 확대하여 도시하였으며 그에 합당한 최적곡선을 함께 표시하였다. 터널시공 전의 분산곡선에 대한 터널시공 후의 분산곡선의 비를 구해보면 그림 12과 같은데, 이로부터 터널 시공으로 인하여 변화된 활주로 기층의 위상속도 변화를 확인해 볼 수 있다. 그림 12에 의하면, 측정된

파장의 범위 내에서 위상속도의 변화는 크게 감소하지 않았으며, 가장 큰 변화는 파장 14~20ft(4.2~6m)의 범위 내에서 평균 속도가 5~8% 정도로 감소한 것이다. 이 정도의 변화는 시추공 C11, C12에서 측정된 S파 속도의 감소된 정도에 비하면 현저히 작은 수치이고, 이로 인하여 우려할 정도의 침하가 발생할 가능성은 없다고 할 수 있다.

또한, 같은 방식으로 터널 중심선으로부터 25ft(7.5m) 떨어진 측선에서 수행된 SASW 실험 SP5~SP7에 대해서도 위상속도의 변화를 구하였으며 그 결과를 그림 13에 도시하였다. 이 경우에서도 위상속도의 변화에는 큰 변화가 없었으며 따라서 우려할 정도의 침하도 발생하지 않을 것이라고 사료된다.

4.2 활주로 인접 지반

활주로 위의 측선이외에도 크로스홀 시험이 수행된 시추공 지역에서 SASW 실험을 수행하였는데, 그림 2의 SP CX1, SP CX2가 이에 해당한다. SASW 실험 측선 SP CX1은 시추공 C9, C10의 중간 지역에서 수행이 되었는데, 여기에서의 실험 결과는 활주로 위에서의 SASW 실험 결과처럼 활주로 기층 부분에 해당되는

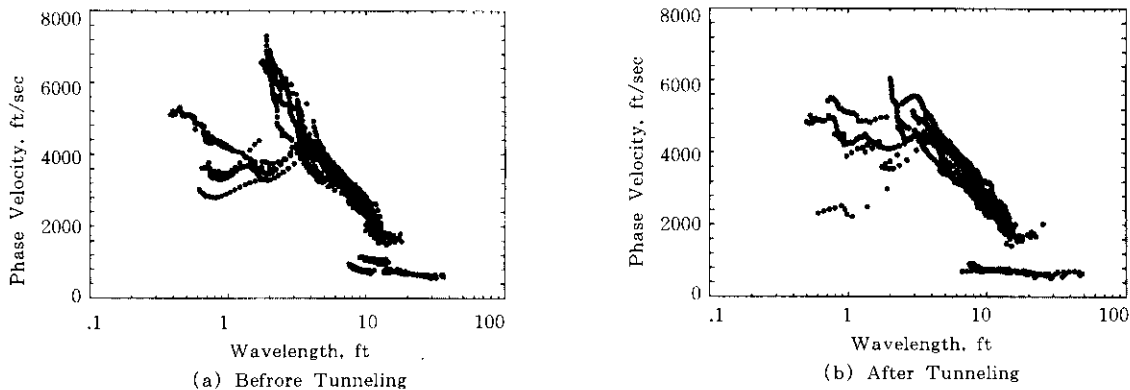
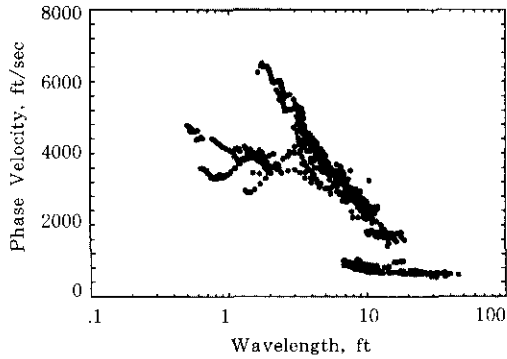
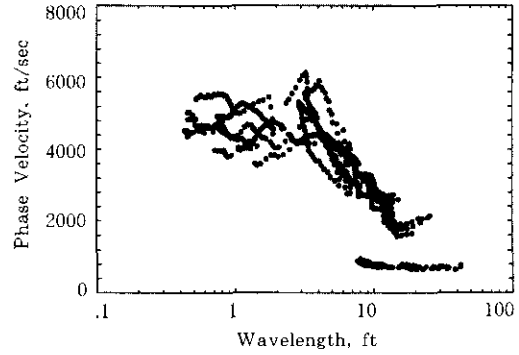


그림 8. Experimental Dispersion Curves Measured at SASW Sites SP1 Through SP4 and Best-Fit Curves

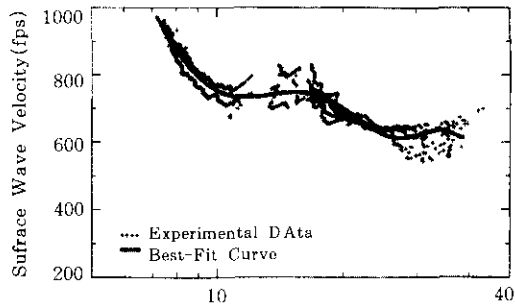


(a) Before Tunneling

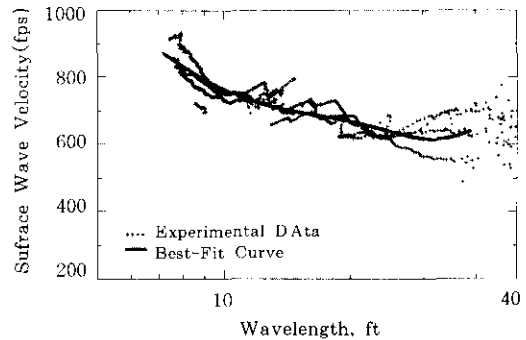


(b) After Tunneling

그림 9. Experimental Dispersion Curves Measured at SASW Sites SP5 Through SP7 and Best-Fit Curves

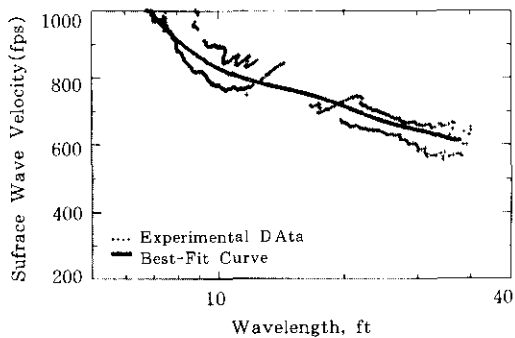


(a) Before Tunneling(12 Jul 1993)

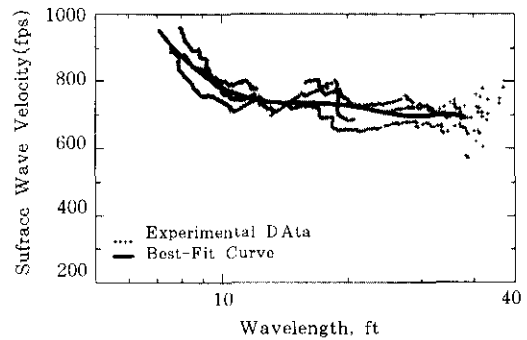


(b) After Tunneling(9 Aug 1993)

그림 10. Experimental Dispersion Curves Measured at SASW Sites SP1 Through SP4 and Best-Fit Curves : Only from Long Wavelengths



(a) Before Tunneling(14 Jul 1993)



(b) After Tunneling(9 Aug 1993)

그림 11. Experimental Dispersion Curves Measured at SASW Sites SP5 Through SP7 and Best-Fit Curves : Only from Long Wavelengths

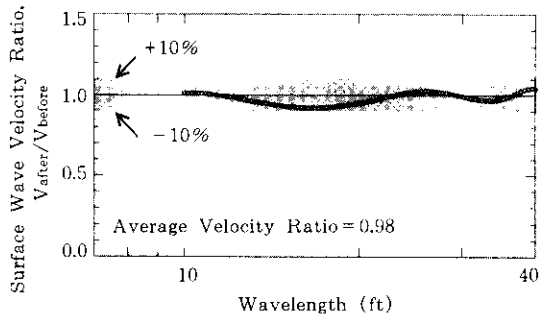


그림 12. Ratios of Best-Fit Curves for Phase Velocities Measured Before and After Tunneling: SASW Sites SP1 Through SP4

파장에 대해서만 터널시공 전에 대한 터널시공 후의 위상속도 비로 그림 14에 표현하였다. 그리고, 시추공 C11과 C12 중간 지역에서 수행이 된 SP CX2 에 대한 결과도 그림 15에 도 시하였다.

크로스홀 시험결과에 의하면 시추공 C9, C10 지역에서는 터널 상부의 지반에는 강성이 있어서 큰 변화가 없었으나, 시추공 C11, C12 지역에 있어서는 지하 10~12ft(0.3~3.6m) 심도에 해당하는 지반에서는 약 25% 정도의 S 파 속도에 감소가 있었다. 이러한 추이는 그림

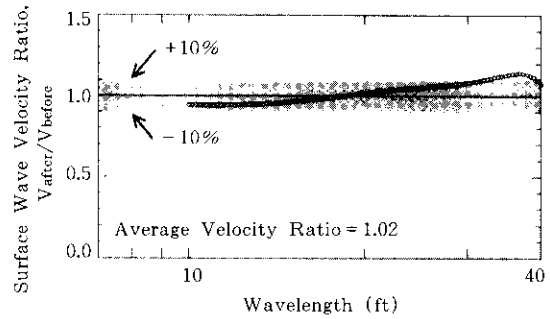


그림 13. Ratios of Best-Fit Curves for Phase Velocities Measured Before and After Tunneling: SASW Sites SP5 Through SP7

14와 15에 제시된 SASW 실험 결과에서도 동일하게 나타나고 있으며, 단지 크기의 정도에만 차이가 있다. 즉, SASW 실험 결과에서는 시추공 C11, C12 지역에 있어서 평균적으로 약 6%의 감소만 보여주고 있는데, 크로스홀 시험에서는 약 25%의 차이가 나타났다. 이러한 크로스홀 시험과 SASW 실험결과와의 차이는 SASW 실험은 크로스홀 시험보다 더 넓은 지역의 평균 물성을 구하기 때문인 것으로 사료된다.

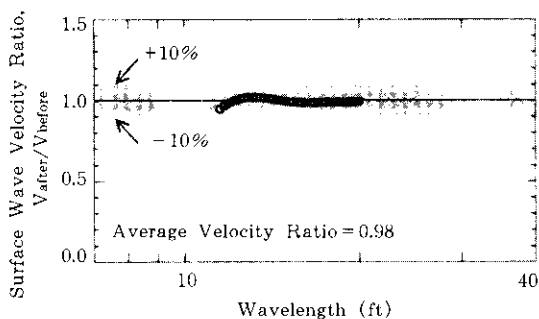


그림 14. Ratios of Best-Fit Curves for Phase Velocities Measured Before and After Tunneling: SASW Site SP CX1

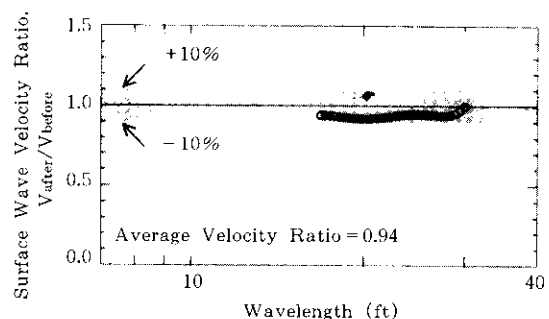


그림 15. Ratios of Best-Fit Curves for Phase Velocities Measured Before and After Tunneling: SASW Site SP CX2

5. S파 속도로부터 추정된 N치

5.1 S파 속도-N 치의 부지특유 관계식

본 연구에서는 터널시공이 지반에 미친 영향을 SPT N치의 형태로 파악하기 위하여 크로스홀 시험으로 측정된 S파 속도로부터 N치를 추정하는 부지특유(site-specific)의 관계식을 개발하였다. JFK 공항에서 실시된 크로스홀 시험은 본 연구에서 언급한 것 이외에도 다수 더 있어서 이들을 포함하면 S파 속도와 상응하는 N치의 자료가 모두 57개가 되는데, 이 중 실제로 S파 속도-N치 관계식의 개발에 사용한 자료는 단지 32개의 자료뿐이다. S파 속도-N치 관계식의 개발에 사용되지 않은 자료로는 깊이 25ft(7.5m)보다 얕은 곳에서 측정된 40 이상의 N치가 포함되며, JFK 공항 지역에 존재하는 피트 층에서 측정된 N치도 배제되었다.

JFK 공항의 부지는 대체적으로 6~10ft(1.8~3m)의 심도까지 조립토의 준설매립층과, 그 하부에 약 0~1.5 ft(0~0.45m) 두께의 피트 층, 이어서 중간크기에서 가는 입자의 사질 토층인 원지반으로 구성되어 있다. 따라서, S파 속도-N치의 부지특유 관계식의 개발에 있어서는 총 32개의 자료를 준설매립층에 해당하는 부류와 원지반에 해당하는 부류로 분류하여 사용하였으며, 결과적으로 두 가지의 관계식을 얻게 되었다.

S파 속도-N치의 부지특유 관계식의 개발에 식 (1)~(4)와 같은 유형의 식을 고려하였으나, 통계학적 처리 결과 이 중 식 (2)의 유형이 가장 적합한 것($r^2=0.53$)으로 나타났다.

$$N = b_1 + b_2 \cdot V_s \quad (1)$$

$$N = c \cdot V_s^h \quad (2)$$

$$N = c \cdot D^{b_1} \cdot V_s^{b_2} \quad (3)$$

$$N = e^{(b_1 V_s + b_2 D + b_3)} \quad (4)$$

따라서, 준설매립층과 원지반에 대하여 최종적으로 결정된 식은 각각 식 (5)와 (6)에 제시된 바와 같다.

• 준설매립층 :

$$N = \left(\frac{V_s}{259} \right)^{3.455} \quad \text{for } V_s \leq 750 \text{ft/sec}; N \approx N_{60} \quad (5)$$

• 원지반:

$$N = \left(\frac{V_s}{277.5} \right)^{3.417} \quad \text{for } V_s \leq 750 \text{ft/sec}; N \approx N_{60} \quad (6)$$

5.2 크로스홀 시험 결과로부터 N 치의 추정

이러한 S파 속도-N 치의 부지특유 관계식을 이용하여 시추공 C9, C10과 C11, C12에서 측정된 S파 속도를 N치로 변환하여 보면, 표 1과 2에 제시된 바와 같게 된다. 앞의 크로스홀 시험에서 언급한 바와 같이 시추공 C9, C10 지역에서는 터널시공으로 인하여 발생한 하부지반의 변화는 거의 없었는데, 변환된 N치에서도 심각한 변화는 없는 것으로 나타났다. 시추공 C9, C10에서의 가장 큰 변화는 터널 바로 아래의 경우로서 N 치가 20에서 17로 낮아진 정도에 지나지 않았다. 그러나, 시추공 C11, C12의 영역에서는 심도 10~13ft(3~3.9m)에서 N 치가 14에서 4로 떨어질 정도로 큰 폭의 감소를 보였는데, 이 정도의 N치 감소는 우려할 정도의 침하를 야기시킬 수 있는 가능성이 있다고 사료된다. 그러나, 시추공 C9, C10 지역의 N 치도 동일 심도에서는 3~5 정도이므로, 시추공 C11, C12 지역에서 침하가 발생한다고 하여도 시추공 C9, C10 지역과 거의 동일한 정도일 것이기에, 시추공 C11, C12 지역에서의 N치의 감소는 우려할 정도는 아니라고 사료된다.

6. 결 론

마이크로터널링에 의해서 전력구가 시공이 된 JFK 공항의 활주로에 대하여 크로스홀 시험과 SASW 실험으로 지반 강성의 변화를 조사하였다. 지반 강성 변화의 조사는 활주로 하부 지반과 활주로 인접 지반에서 깊이별로 S

Table 1. Measured and Estimated Uncorrected SPT N-Values at Boreholes C9 and C10

Depth (ft)	Shear Wave Velocity		Uncorrected SPT-N Value		
	Before Tunneling (ft/sec)	After Tunneling (ft/sce)	Before Tunneling		After Tunnelling (Estimated)
			(measured) 24-Sep-92	(Estimated)	
2	502			10	
2.5			Auger		
3	506	552		10	14
4			Auger		
4.5	484	540		9	13
5.5			9		
6	404	417		5	5
8	399	416	5	4	5
9		414			5
10	401	410		5	5
10.5			2		
11		405			4
12	388	396		3	3
13		733	13		28
14	655			19	
15.5			26		
16	699			23	
17					
18	666	632	32	20	17
19		632			17
20	683	647		22	18
20.5			9		
21.5		668			20
23	687	656		22	19

※ Shaded area : Approximate tunnel location.

Table 2. Measured and Estimated Uncorrected SPT N-Values at Boreholes C11 and C12

Depth (ft)	Shear Wave Velocity		Uncorrected SPT-N Value		
	Before Tunneling (ft/sec)	After Tunneling (ft/sce)	Before Tunneling		After Tunnelling (Estimated)
			(measured) 24-Sep-92	(Estimated)	
3	573	558	24	16	14
5	487	436	48	9	6
7	475	431	4	8	6
9.5			5		
10	560	408		11	4
11	595	415		14	4
12		423	5		4
13	596			14	
14	594			13	
14.5			21		
16	683			17	
17			58		
18	642	600		18	14
19	639	693		17	23
20		661			19
22.5	655	651		19	18
25	613	620		15	16

※ Shaded area : Approximate tunnel location.

과 속도의 변화를 평가하는 것이었으며, JFK 공항 부지특유의 S파 속도-N 치 관계식을 이용하여 깊이별 N 치의 변화도 추정하였다.

JFK 공항의 활주로에서 수행한 지반 강성 변화의 평가와 관련하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 터널시공으로 인하여 활주로 인접 지반과 활주로 기층에서 전단강성 또는 전단강도가 저하된 지역을 크로스홀 시험과 SASW 실험으로 확인할 수 있었으나, 이로 인하여 우려할 정도의 침하는 발생하지 않으리라 사료된다.
2. 마이크로터널링이 활주로 기층에 미친 영향을 평가하기 위하여 활주로 위에서 비파괴적으로 SASW 실험을 수행하였는데, 실험으로 측정된 위상속도 분산곡선에 의하면 활주로 기층부분의 지반이 비교적 균질한 것으로 평가되어 단지 위상속도만으로도 활주로 기층에 대한 마이크로터널링의 영향을 평가할 수 있었다.
3. JFK 공항 활주로 인근의 시추공에서 측정한 S파 속도와 N 치에 의해 부지특유의 S파 속도-N치 관계식을 결정하였으며, 이 관계식을 이용하여 추정한 N 치는 활주로 기층과 인근 지반에 대한 터널 시공의 영향을 전단강도의 측면에서 이해하는데 도움이 되었다.

참 고 문 헌

1. Ballard, R.F., Jr. (1964), "Determination of Soil Shear Moduli at Depth by In Situ Vibratory Techniques," *Miscellaneous Paper No. 4-691*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 9pp.1.
2. Heisey, J. S., Stokoe, K.H., II, Hudson, W. R. and Meyer, A. H. (1982). "Determination of in situ shear wave velocities from Spectral-Analysis-of-Surface-Waves." Research Report No. 256-2 Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin
3. Hoar, R.J. and Stokoe, K.H., II. (1978) "Generation and Measurement of Shear Waves In Situ," *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 3-29.
4. Joh, S.-H. (1996). "Advances in data interpretation technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) measurements." Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
5. Jones, R., (1962). "Surface Wave Technique for Measuring the Elastic Properties and Thickness of Roads: Theoretical Development." *British Journal of Applied Physics*, Vol. 13, pp. 21-29.
6. Foinquinos, R. and Roesset, J.M., Stokoe, K.H., II. (1991). *Analytical Study and Inversion for the Spectral Analysis of Surface Waves Method*, Research Report 1175-3, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
7. Richart, F.E., Hall, J.R., and Woods, R.D., (1970). *Vibration of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 414 pp.
8. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K. (1986). "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 11, pp.1016-1032.
9. Sykora, D.W., and Stokoe, K.H., II (1983), "Correlations of In-Situ Measurements in Sands of Shear Wave Velocity, Soil Characteristics, and Site Conditions," Geotechnical Engineering Report GR83-33, Geotechnical Engineering Center, The University of Texas at Austin.
10. Sykora, D.W., (1987), "Examination of Existing Shear Wave Velocity and Shear Modulus Correlations in Soils", *Miscellaneous Paper GL-87-22*, U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
11. Woods, Richard D., (1978), "Measurement of Dynamic Soil Properties," *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol. I, Proceedings, American Society of Civil Engineers, Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, Pasadena, California, pp. 91-178.

(접수일자 1998. 2. 13)