[해 설] - 비 파 괴 검 사 학 회 지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 20, No. 4 (2000. 8)

콘크리트 구조물의 비파괴검사 현황

Nondestructive Testing of Concrete Structure

김영환*
Young. H. Kim*

1. 서 론

1960년대 이후의 급속한 경제발전과 더불어 교통시설, 항만시설, 발전설비, 에너지 저장시설 등과 같은 우리나라의 국가기간 시설물의 건설이 활발히 진행되었다. 이러한 국가기간 시설물은 국가 경제의 기반인 핵심 시설로 그 중요성은 매우 크다. 그러나, 성수대교와 삼풍백화점과 같은 대형구조물의 잇따른 붕괴로 인하여 국가기간 시설물의 안전문제가 심각한 사회문제로 대두되었다. 대형 구조물의 사고를 미연에 방지하기 위하여 주기적인 안전 점검, 정확한 구조해석 기술, 신뢰성 높은 비파괴검사 기술, 사용 중 재료의 열화와 손상의 정량적인 평가 기술, 파괴역학에 기초한 잔여수명 평가 기법 등은 필수적이다. 특히 우리나라의 비파괴검사 기술의 수준은 구조물의 안전평가에 근거가 되는 검사 결과를 제공하기에는 부족한 점이 많다. 따라서 안전진단에 필요한 다양한 비파괴검사 기술이 요구되고 있으며 이러한 비파괴검사 기술의 정밀성이 곧 안전진단의 신뢰도와 직결된다고 할 수 있다.

현대 건축 및 토목분야에서 콘크리트는 가장 널리 쓰이는 구조재료이며 따라서 콘크리트의 상태는 구조물의 안전에 절대적인 영향을 미친다. 특히 콘크리트는 일반 건축물 뿐만 아니라 교량이나 댐과 같은 산업 구조물, 원자력 발전 설비나 군사 시설물과 같은 특수 대형 구조물에도 널리 쓰이고 있어 그 중요성은 더욱 크다. 콘크리트는 다른 재료에 비하여 내구성 및 내열성이 뛰어나고 어떤 형상의 구조에도 쉽게 타설할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 콘크리트 구조물은 다른 구조물에 비하여 자체 하중이 크고 균열이 생기기 쉬워서 붕괴의 우려성을 내포하고 있다. 콘크리트 구조물의 붕괴와 파손은 구조물의 설계 또는 시공상의 과오에 의한 요인 뿐만 아니라 사용시간의 경과에 따른 적절한 안전점검과 유지관리의 소홀로 인하여 발생할 수도 있음을 간과해서는 안된다. 대형 콘크리트 구조물의 안전진단은 콘크리트 열화기구와 과정을 규명하고 결함 및 손상의 원인을 분석하여 적절한 검사 기법을 적용하여 수행되어야 한다. 그러나 우리나라에서는 아직까지 콘크리트의 강도 측정기법이나 상태를 평가하는 검사기술에 대한 적절한 기준이나 개념이 정립되어 있지 않다. 본고에서는 콘크리트 구조물에 사용되고 있는 비파괴검사 기술의 동향을 분석하여 기술한다.

2. 콘크리트 비파괴검사의 대상

콘크리트에서 사용되는 부재에 따라서 발생 가능한 결함의 종류가 달라지고 또한 결함이 구조물의 안전성에 미치는 영향이 달라진다. 즉, 부재별로 집중적으로 관심이 있는 결함의 종류가 달라진다. Fig. 1에는 콘크리트에 발생할 수 있는 대표적인 결함의 예를 도식적으로 나타내었다. 이와 같이 복잡한 대상체에서 다양한 결함을 한 두가지의 시험법으로 찾아내는 일은 거의 불가능하다. 따라서, 다양한 시험법이 콘크리트 구조물의 안전도 진단에 활용된다. 대표적으로 콘크리트에 적용되는 시험법들을 요약하여 Table 1에 나타내었다[1].

콘크리트 비파괴검사에서 가장 큰 관심사 중의 하나는 압축강도이다. 콘크리트의 강도는 시간이 지남에 따라 변하고 이 변화는 주위의 기후 조건, 사용 환경, 콘크리트의 배합 조건 등에 따라 달라진다. 특히 화재, 지진

(접수 : 2000. 6. 24) * 성균관대학교 산업설비 안정성평가 연구센터(Safety and Structural Integrity Research Center, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746)

등의 외부 충격을 받았을 경우는 콘크리트의 강도는 현격히 떨어지게 되고 이러한 경우는 안전진단을 통하여 재사용 여부를 결정해야 한다. 따라서 콘크리트의 강도를 측정하고자 많은 방법이 고안되었고, 그 중에서 가장 신빙성이 있는 강도 측정은 구조물로부터 채취된 코어에 대한 압축강도시험법[2]이다. 이 방법은 구조물에 손상을 주므로 대개의 경우는 타설시 제작된 공시체에 대한 압축 강도 시험으로 수행되며, 기존의 구조물에 대해서는 가능한 한 적은 갯수의 코어를 채취하는 것이 바람직하다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 압입법[3], 관입법[4], 인발법[5], 반발경도법[6], 공진법[7], 초음파 속도법[8] 등의 비파괴검사법이 고안되었다. 이 방법들은 각각의 장단점을 지니고 있는데 서로 보완적으로 사용되고 있으며, 국내에서는 반발경도법, 초음파 속도법이 널리 사용된다.

또다른 주요 관심사는 균열이다. 콘크리트 구조물은 다른 구조물에 비하여 자체 하중이 크고 균열이 생기기 쉬워서 붕괴의 우려성을 내포하고 있다. 콘크리트의 균열은 여러가지 원인에 의하여 콘크리트의 경화를 전후로

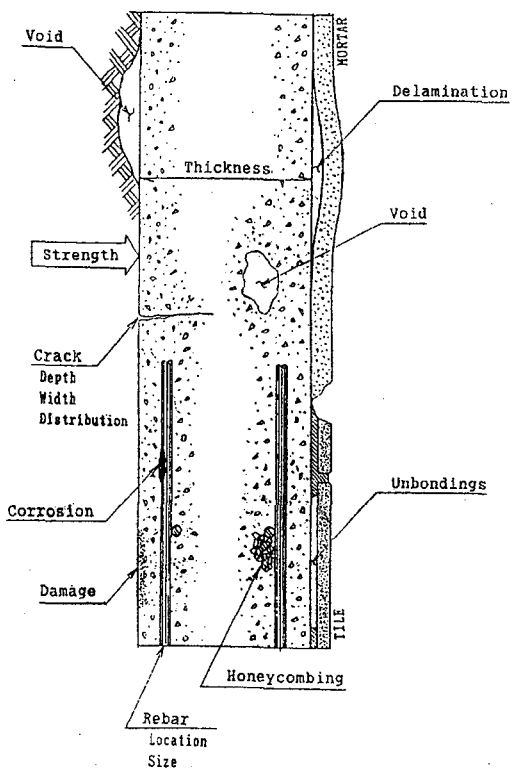

Fig. 1 The possible flaws in concrete

하여 나타나는데 균열이 표면에서 관측할 수 있을 때면 이미 콘크리트 내부조직에는 미세 균열로 인하여 조직이 상당히 손상되어 있다. 콘크리트내에 균열이 생기면 이 콘크리트의 강도는 기대치에 미치지 못할 뿐만 아니라, 주위의 온습도의 변화, 소금물과 같은 화학성분의 침투로 균열이 점차 성장하고 마침내 철근이 부식되어 콘크리트의 안전도에 큰 문제를 일으키게 된다. 표면 균열을 탐지하는 데에는 육안관측법이 가장 유력하다. 육안 검사로 균열의 발생부위, 균열의 형태, 균열의 정도 등을 관찰하여 균열의 발생원인을 추정한다. 일반적으로 검사결과는 스케치나 사진기를 이용하여 기록한다. 최근 들어서 디지털 카메라와 컴퓨터를 사용하여 균열 인식 시스템이 개발되었다. 균열의 폭은 보수 여부를 결정하는 중요한 인자 중의 하나로 일본 콘크리트 공학회의 경우에는 내구성의 경우는 0.1mm, 방수성의 경우는 0.5mm를 기준으로 정하고 있다. 개발 중인 자동화 계측 시스템으로는 레이저 스캔을 이용한 것으로서 균열부위에서 산란되는 레이저 광이 줄어드는 점을 이용하는 방법으로 균열의 폭이나 위치를 정량적으로 측정하는 것이 가능하나 깊이 정보를 얻기에는 어렵다. 결함의 깊이를 얻기 위해서는 초음파를 이용하는 방법이 가장 유력하다.

구조물의 두께 또한 중요한 검사 대상이다. 구조물이 공기 중에 노출되어 있을 경우에는 여러 가지 방법으로 그 두께를 측정할 수 있으나, 한쪽 면만 노출되어 있을 경우에는 충격-공진법이나 GPR이 유용하다. 골재의 크기가 작을 경우에는 초음파 pulse-echo 방법도 사용이 가능하다. 도로 포장의 두께는 GPR을 이용하여 탐지가 가능하며 시속 10km 정도의 속도로 움직이면서 측정도 가능하다.

철근 콘크리트에서는 철 보강재의 상태가 중요하다. 이는 철근의 위치, 특히 철근까지의 깊이가 매우 중요한 인자 중의 하나이다. 이는 굵기가 알려져 있는 경우에 cover meter를 사용하면 그 깊이를 알 수 있다. 보강재의 부식 여부도 매우 중요한데 전기화학적인 방법을 이용하면 부식 여부를 감시할 수 있다. 콘크리트에 염소가 침투하면 보강재의 부식을 촉진시키므로 임계 염소 함량 깊이를 모니터링 하는 방법도 이용된다.

콘크리트 내부에 공동과 같은 구조물 내부의 상태도 관심사이다. 다짐 불량 등으로 인한 honeycomb 구조도 안전도에 지대한 영향을 미친다. Post-tension duct 내에 공동이 있으면 침수가 가능해 tension cable을 부식시킬 것이다. 터널의 경우에도 콘크리트 뒷면에 공동이 있으면 붕괴의 우려성이 높아진다.

이외에도 내구력은 구조물의 수명 측면에서 매우 중요한 성질인데, 구조물 내부에 기공율 또는 기체의 투과율을 측정하여 내구성을 평가할 수 있다. 수분 함량, 습도, 밀도, 열전도, 박리 등도 중요한 검사 대상들이다.

3. 콘크리트 비파괴검사 방법

3.1. 반발경도법

반발경도법은 콘크리트의 압축강도를 추정하기 위하여 이용되고 있으며, 슈미트 해머와 같이 보편화된 장치는 오랫동안 전세계적으로 널리 사용되어 왔다. 이들의 사용법에 대해서는 BS 1881: Part 202[9], ASTM C805[10],

Table 1 Application of NDI for existing concrete structure

Time	Items	Measurement	Methods	Comments
Just after construction	Dimension	Cross sectional dimension	Measure, Transit, Laser	When structure is in the open air
			Ultrasonic, Impact-echo, Radar	When a part of the structure is embedded
	Arrangement of steel reinforcement	concrete cover	Radar, Electromagnetic, X-ray	Surface bar only
		Bar spacing	Radar, Electromagnetic, X-ray	Surface bar only
		Bar diameter	Radar, Electromagnetic, X-ray	Surface bar only
	Structure	Overall stiffness	Oscillation test	Amplitude, Frequency
After several years of usage	Appearance	Deterioration	Visual inspection, Photograph	Stain, Cracks
		Defects (surface)	Digital still camera, Thermograph	Including honeycomb, cold joints
		Defects (Inside)	Sonic, Thermograph, Rada, Ultrasonic, X-ray, Impact-echo	Voids inside and at the back of the structure
	Stress and strain	Deformation (Macro)	Measure, Transit, Laser	
		Deformation (Micro)	Dial gauge, strain gauge	
		Vibration	Acceleration sensor, LVDT, Laser deformation measurement	
		Stress	Mold gauge, Optical sesnor	
	Strength and stiffness	Concrete strength	Core sample test	General method
			Rebound hammer, Pull-out test	Problem of accuracy
		Modulus of elasticity	Core sample test	
			Ultrasonic velocity	
	Cracks and spalling	Distribution	Digital still camera, Thermograph	
		Crack width	Digital still camera, Thermograph	Direct measurement possible
		Crack depth	Ultrasonic	Effect of bars
		Cracking	Acoustic Emission	Continuous measurement required
	Diffusion depth	Carbonization	Core sample test	Analysis by core samples
		Chlorides	Core sample test	
		Acids	Core sample test	
		Other substance	Multi-spectrum method	Limited to concrete surface
	Permeability	Permeability	On-site permeability test	
	Steel Corrosion	Location	Natural potential	Location at that time
		Corrosion degree	Natural potential Electric current analysis	Periodic measurement required

RILEM/NDT-3[11] 등에 코드화 되어 있다. 이 방법은 콘크리트 표면을 강구로 치면 강도가 높은 콘크리트에서 반발도가 커지는 특성을 이용한다. 슈미트 해머는 Fig. 2와 같은 구조를 지니고 있는데 스프링의 반발력을 이용하여 콘크리트를 해머로 쳐서 반발경도 시험을 한다. 그리고 미리 반발도(R값)와 압축강도 사이의 관계를 구하여 놓고 측정된 R값으로부터 압축강도를 추정한다. 슈미트 해머는 그 용도에 따라서 보통 콘크리트용 (N형, NR형), 저강도 콘크리트용(P형), 매스 콘크리트용 (M형) 및 경량 콘크리트용(LR형)의 네 종류가 있고 NR형 및 LR형은 반발도를 기록하는 장치를 부착한 것도 있다.

반발경도시험을 위해서는 먼저 콘크리트 표면을 숫돌로 문질러서 평탄하게 한다. 수 cm 간격을 띄워서 20개소를 타격하여 그 평균값을 구한다. 타격의 방향에 따라서 R값이 다르므로 보정하여 사용한다. 또한 기둥이나 벽체와 같이 압축력이 작용하는 경우에는 압축응력에 따라서 보정하여 사용해야 한다. 콘크리트에 습기가 차 있는 경우에는 건조한 경우에 비하여 R값이 5% 정도 작아진다. 콘크리트 재령이 늘어나면 R값은 커진다. 콘크리트의 두께가 10cm 이하에서는 반발도가 급격히 작아지는데 30cm 이상이면 R값은 안정된다.

앞에서 언급한 바와 같이 슈미트 해머에 의한 압축강도 추정에 있어서 시험방법이나 조건에 따라서 그 결과가 달라진다. 특히 문제가 되는 것은 R값으로부터 압축강도를 추정하는 관계식에 따라서 추정값이 대폭 달라지는 것이다. 따라서 가능하다면 시험 대상 구조의 수개소에서 반발도를 구하고 그 부위에서 코어를 채취하여 압축강도를 측정하여 관계식을 정하도록 한다. 슈미트 해머의 정밀도는 test anvil을 타격하여 교정한다.

3.2. 탄성파를 사용한 비파괴검사

3.2.1. 공진법

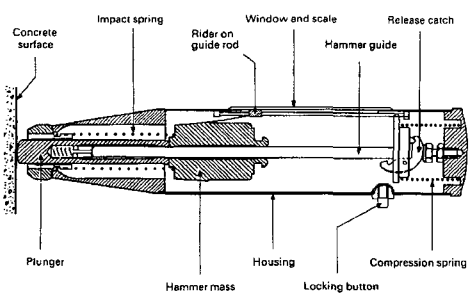

Fig. 2 Typical rebound hammer

공진법은 시험체의 공진 주파수가 시험체의 크기 및 형상과 시험체의 탄성계수에 의해 결정되는 성질을 이용하여 시험체의 공진 주파수를 측정하고 그 결과로부터 시험체의 탄성계수를 계산하는 방법이다. 이 방법을 위하여 외부로부터 특정한 주파수의 진동을 시험체에 가하고 이때 발생하는 시험체의 진동 크기를 측정한다. 구동 주파수를 바꾸어 주면서 시험체의 진동의 진폭이 최대가 되는 때로 부터 공진 주파수를 결정하고 이로부터 탄성계수를 계산한다[7].

이때 구동 장치와 진동 검출기의 위치에 따라서 transverse, torsional, longitudinal 진동 모드에 해당하는 공진 주파수를 얻을 수 있고, 이에 따라서 탄성계수를 구할 수 있다. 이와같이 얻어진 탄성계수는 일반적으로 정적인 시험에서 얻어지는 탄성계수보다는 큰 값을 나타내며 공진법에 의해서 구해진 탄성계수를 동탄성계수라 한다[12].

이 방법은 주로 탄성계수와 압축강도와의 관계를 규명하는데 사용되어 왔는데, 동탄성 계수와 압축강도는 어느 정도의 오차 범위 내에서 함수관계를 지님을 알 수 있다. 이 오차의 원인은 압축 강도가 동탄성계수의 어떠한 일정한 함수로 주어지지 않기 때문이다.

공진법을 내구성 연구에 응용한 대표적인 예를 Fig. 3에 나타내었다[13]. 양생조건이 다른 두 콘크리트 시험편에 동결-융해 과정을 반복하면서 동탄성계수의 변화를 측정한 것으로서 습식 양생만 하였을 경우에는 건조시킨 시험편에 비하여 내부에 수분이 많으므로 동결-융해 과정을 반복함에 따라 시험편의 열화가 빨리 일어나 결과적으로 동탄성계수의 급격한 감소가 일어났다.

이와 같이 공진법은 시험방법 및 사용 장치의 표준화도 이루어져 있으며 또한 활용 범위는 넓으나, 일정한 크

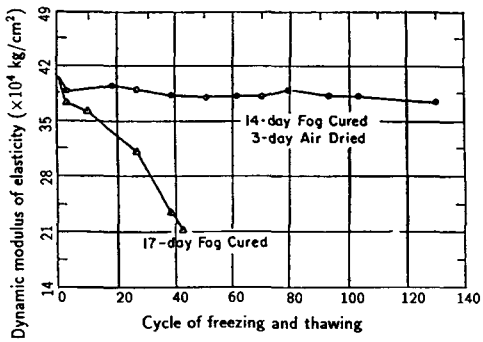

Fig. 3 Effect of cycles of freezing and thawing on dynamic Young's modulus of elasticity

기의 시험편이 필요하므로 현장 구조물에 직접 적용하기는 곤란하다. 그러나, 실험실에서의 콘크리트 양생 과정 감시와 내구성 평가 등을 위한 비파괴 시험으로서 중요한 위치를 차지하고 있다.

3.2.2. 초음파 속도법

재료내에서의 초음파 속도는 탄성계수에 영향을 받으므로 초음파 속도를 측정하여 콘크리트의 강도를 추정하고자 하는 방법이 시도되었다. 콘크리트의 경우 강도와 탄성계수 사이에는 직선적인 비례관계가 있다. 초기에는 콘크리트의 한쪽 부분을 망치로 두드려서 두 부분에 위치한 센서에 도착하는 탄성파의 시간차를 측정하여 탄성파의 속도를 측정하였으나 그 후로는 Fig. 4와 같이 압전소자를 이용한 탐촉자를 사용하여 초음파를 발생시키고 수신하는 장치를 사용하여 측정하게 되었다[14,15]. 이 방법에 대하여 BS 1881: Part 203[16]와 ASTM C597[17]에 코드화 되어 있다. 일반적으로 콘크리트 내부에서의 초음파의 산란과 초음파의 발생의 기술적인 문제로 주로 50kHz 정도의 낮은 초음파를 사용하여 투과에 의한 시험법을 많이 사용하고 있다. 콘크리트에서의 초음파 속도 측정을 위해 일반적으로 두 개의 탐촉자를 사용하여 두 탐촉자 사이의 초음파 전파 시간을 측정하는데 이때 탐촉자의 배열법을 Fig. 5에 나타내었다. 이 중에서 가장 정확한 방법은 Fig. 5(a)와 같은 직접법으로 시험편의 양쪽면에 탐촉자가 접근할 수 있을 때이다. 직접법을 사용하기 곤란한 경우에는 Fig. 5(b)와 (c)에 나타낸 바와 같이 반직접법이나 간접법을 사용한다. 간접법을 사용할 경우에 탐촉자의 크기로 인하여 초음파 전파 경로를 정확하게 결정할 수가 없다. 따라서 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 특별한 절차가 필요하다. 즉, 발진자를 고정시키고 수신자의 위치를 바꾸면서 경과 시간을 측정하고 Fig. 7과 같이 탐촉자의 간격과 경과시간을 도시하여 fitting 직선의 기울기로부터 속도를 구할 수 있다.

대표적으로 콘크리트의 재령에 따른 초음파 속도와 콘크리트의 압축강도 사이의 관계는 Fig. 8과 같다. 이 결과에서 보면 초음파 속도와 압축강도의 전반적인 상관관계는 낮으나, 재령을 결정해 주면 높은 상관관계를 얻을 수 있다. 또한 배합조건을 변화시켰을때의 초음파 속도와

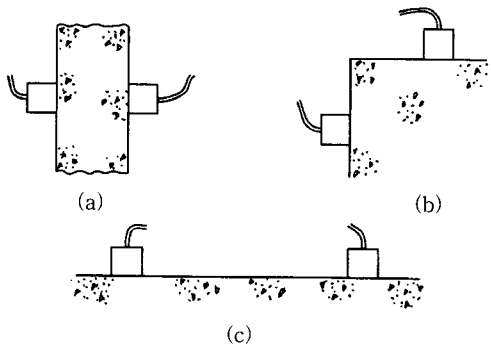

Fig. 5 Types of reading (a) Direct; (b) semi-derect; (c) indirect

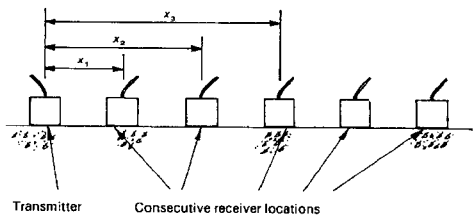

Fig. 6 Indirect reading - transducer arrangement

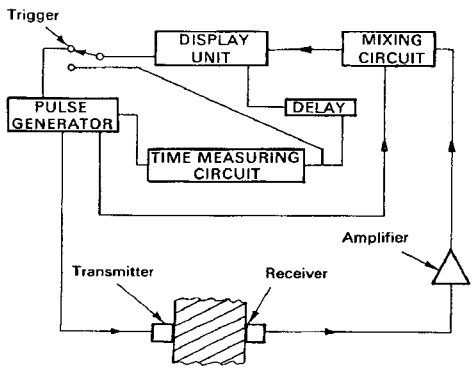

Fig. 4 Typical ultrasonic pulse velocity testing equipment

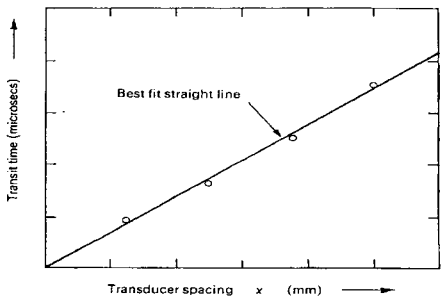

Fig. 7 Indirect reading - results plot

압축강도와의 관계는 Fig. 9(a)와 같다[18]. 이 경우도 상관 관계가 낮으나 배합 조건을 제한하면 Fig. 9(b)와 Fig. 9(c)와 같이 되어서 상관관계가 비교적 높아진다. 이와 같이 일반적으로 초음파의 속도와 압축강도 사이의 상관관계가 낮은 이유는 공진법의 경우와 마찬가지로 탄성계수와 압축강도가 일정한 함수관계로 표시될 수 없기 때문이다. 그러나 일반적으로 초음파 속도가 빠르면 콘크리트의 강도가 높아지는 경향이 있으므로 상대적인 콘크리트 품질에 대한 비교 평가에 활용할 수 있다.

또한, 이 초음파 속도법은 콘크리트의 환경 조건에 의한 열화정도의 측정에도 활용될 수 있다. 콘크리트에 동결-융해 과정을 반복하였을 때의 초음파 속도 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 이 결과는 콘크리트가 동결 융해를 반복하였을 때의 열화되는 정도를 초음파 속도에 의해 결정할 수 있음을 의미한다. Fig. 11에는 콘크리트를 높은 온도에서 1시간 방치한 후에 열처리 온도에 따른 상온에서의 휨강도 변화 및 초음파 속도의 변화를 나타내었다. 이 결과로 부터 열처리 온도가 높아질 수록 휨강도는 떨어지고 이와 함께 초음파 속도도 낮아짐을 나타내고 있다. 따라서 화재로 손상된 콘크리트 구조물의 사용 여부 및 보수부위 판별에 활용할 수 있다.

한편 Fig. 12와 같이 콘크리트의 표면에 균열이 존재하면 한 탐촉자에서 발생된 초음파는 균열 끝부분을 돌아서 도착하게 되므로 균열이 존재하지 않는 부위에 비하여 초음파가 도달하는 시간이 길어지게 된다. 균열이 존재하는 부분에서의 초음파의 도달시간을 t_c, 균열이 없는 부분에서의 초음파의 도달시간을 t_0, 이라 하면 균열의 깊이 h는

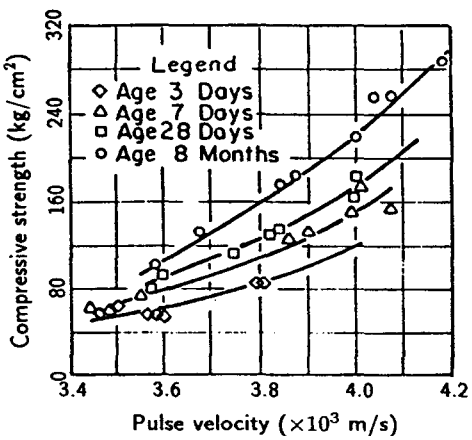

Fig. 8 Influence of age of concrete on the correlation between ultrasonic pulse velocity and strength

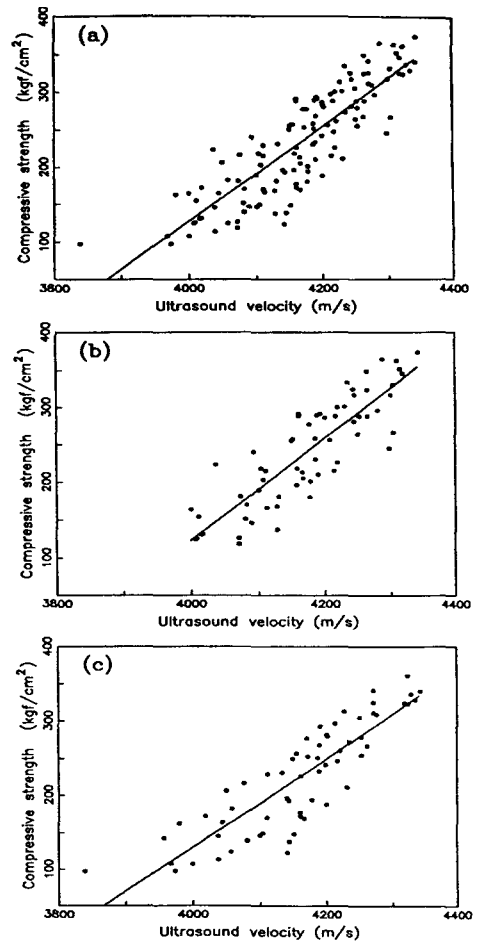

Fig. 9 Ultrasonic pulse velocity versus compressive strength (a) Overall specimens; (b) slump larger than 10cm; (c) slump lower than 10 cm

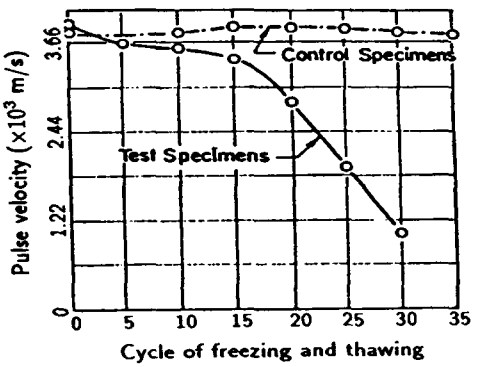

Fig. 10 Effect of freeze-thaw cycling on ultrasonic pulse velocity

$$h=\frac{x}{2}\sqrt{(t_c/t_0)^2-1} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서 x는 균열으로 부터 탐촉자 지의 거리이다.

이상과 같이 응용범위가 넓고 시험편의 크기에 제약을 받지 않는 초음파 속도법은 휴대용 장치가 상용화 되어 있어서 현장 구조물에 직접 적용할 수 있으나 콘크리트 내부에서의 초음파 산란이 크므로 pulse-echo 시험이 곤란하다. 따라서 내부결함 탐지, 철매립물 검출 등에 활용하기는 곤란하다.

3.2.3. 탄성파 충격-공진법

이 방법의 기본 원리는 공진법과 같으나, 동탄성계수를 결정하기 보다는 주로 결함 탐지에 이용된다. 콘크리트 내부에서의 탄성파의 산란이 크므로 초음파 pulse-echo 시험을 실시하기 위해서는 골재의 크기보다 훨씬 큰 파장의 초음파를 사용하여야 하는데 저주파 초음파의 경우는 지향성이 적어지고 초음파의 pulse 폭이 넓어져서 반사파 신호를 얻기가 어렵다.

따라서 새로운 결함 탐지법에 대해 한국표준과학연구원과 미국립표준기술연구소가 공동으로 콘크리트 시험편의 공진 주파수로부터 결함을 검출하는 충격-공진법을 개발하였다. Fig. 13에 나타낸 바와 같이 이 방법은 공진법에서 구동 주파수를 변화시키면서 공진주파수를 찾는 방법과는 달리 짧은 시간 폭의 충격을 가하여 시험편 내부에 광대역 탄성파를 발생시키면 시험편의 공진조건을 만족하는 주파수의 탄성파만 남게 된다. 이 진동 신호를 주파수 분석을 하면 공진 주파수를 알게 되고 속도를 알면 이로부터 시험편의 크기를 결정할 수 있다[18-20,23]. 이 방법은 콘크리트 슬래브의 두께 측정[21], 공동탐사, 박리 검사 tendon과 같은 보강재의 상태진단, 다짐불량으로 인한 honeycomb 구조 검출[22]과 같은 콘크리트 구조물의 안전도 진단의 수단으로 널리 사용되며[24], 하나의 표준 시험법으로 자리를 잡아가고 있다[24].

대표적으로 Fig. 14(a)에 나타낸 바와 같이 전체 두께 50cm인 콘크리트 내부의 깊이 10cm에 있는 직경 50cm인 원판형 결함에서의 충격에 의한 진동신호의 주파수 스펙트럼을 위치별로 Fig. 15에 나타내었다[25]. Fig. 15의 공진 주파수로부터 두께를 산출하여 그 결과를 Fig. 14(b)에 나타내었는데 그 결과 결함의 형상을 파악할 수 있다. 그밖에도 경사진 결함, 다층의 결함, 구형 결함 탐지에도 우수한 결과를 얻을 수 있으며, 결함의 직경이 깊이의 절반보다 클 경우에는 결함의 깊이를 결정할 수 있었다. 또한 두께가 1m까지의 시험편에서도 결함 탐지가 가능하였고, 시험편의 크기가 유한한 경우에는 시험편의 공진 모드를 고려하여 두께에 대한 공진 주파수만을 분리할 수가 있었다[26].

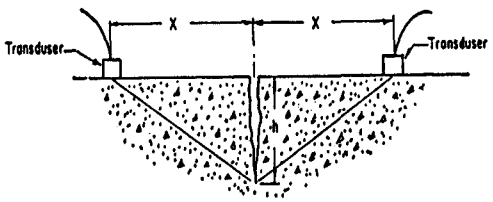

Fig. 12 Measurement of crack depth

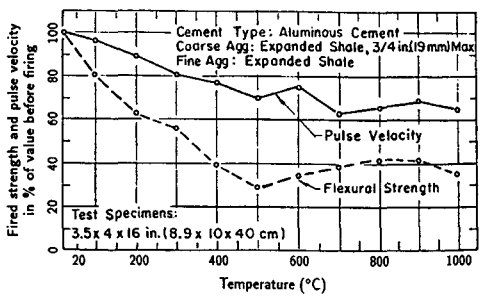

Fig. 11 Loss in ultrasonic pulse velocity and flexural strength of concrete prism after exposure to temperature to 1000℃

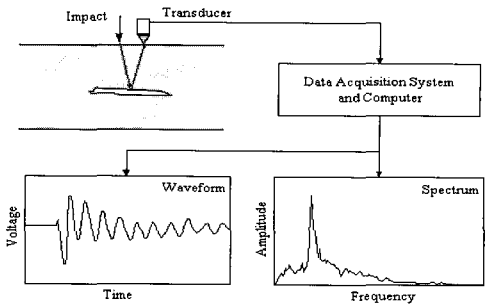

Fig. 13 Schematic diagram of impact-resonance testing[23]

3.2.4. One-Sided Technique

탄성파를 이용한 One-sided technique은 탄성파 충격-공진법을 발전시켜서 Fig. 15와 같이 표면의 한쪽에 충격을 가하고 두 개의 탐촉자를 사용하여 전파하는 탄성파 신호를 수신한다. 이 방법은 주로 콘크리트 포장도로와 같은 검사 대상체의 한쪽면 만이 접근 가능한 콘크리트 구조물의 비파괴 평가를 위해 종파와 표면파를 동시에 측정하는 방법이다. 일반적인 초음파 기법과는 달리 비교적 검사 대상체가 크고 두꺼우며 넓은 구조물에 대하여 적용이 가능하며 검사대상면의 반대쪽으로의 접근이 용이하지 않은 구조물 또는 검사 대상면 이외의 면의 형상이 불규칙하여 초음파 투과법이나 반사법을 적용할 수 없는 경우 one-sided technique을 사용하면 한쪽면에서 비교적 신뢰성 높은 탄성파 속도를 측정할 수 있다. 특히 이 기법은 구조물의 한쪽면에서 종파(creeping L-wave)와 표면파의 검출이 동시에 가능한 이점이 있어 콘크리트 구조물에 존재하는 표면 근처의 결함 및 내부 손상도를 평가하는데 매우 유익한 수단으로 보고되고 있다[27,28]

3.2.4. 음향방출법

음향방출(Acoustic Emission: AE)은 고체내부에 국부적으로 형성되었던 변형에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파로 정의되지만, 이와 같은 현상 자체는 물론이고 이를 이용한 시험방법까지도 포함하는 넓은 의미로 사용된다[29]. AE는 1950년대 이후 금속이나 암반 분야에서 파괴 예측 등에 유효하게 이용어 왔다. 콘크리트 분야에서도 1960년대 이후 여러 가지의 연구가 수행되었지만, 일본의 경우에는 1980년대에 들어서 많은 연구가 수행되어 실구조물에 적용한 예도 다수 보고되었다. 우리나라에서도 1995년 이후에 꾸준한 연구가 진행되고 있다.

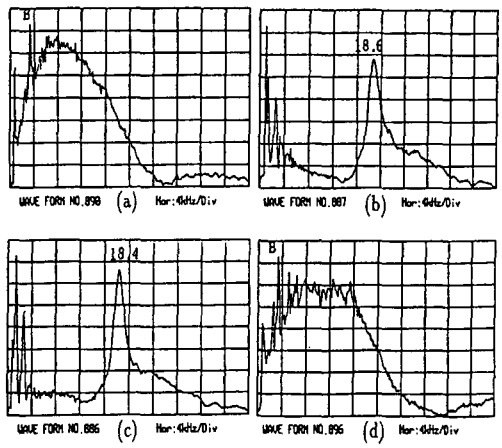

Fig. 15 The frequency spectra obtained from the concrete surface over the 10 cm depth and 50cm diameter flaw for positions (a) 3, (b) 6, (c) 7, (d) 12 shown in Fig. 14(a)

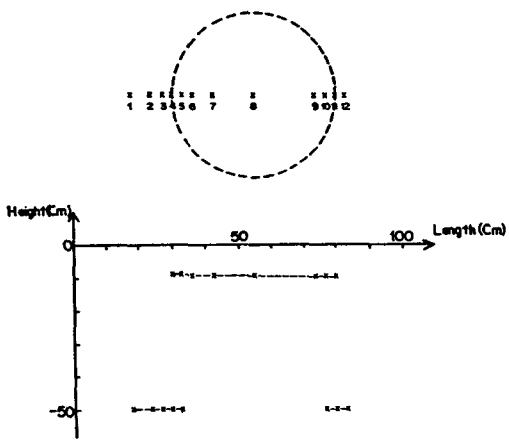

Fig. 14 (a) Test locations corresponding to Fig. 15 spectra. (b) Experimental depth finding of the flaw based on Fig. 15 spectra

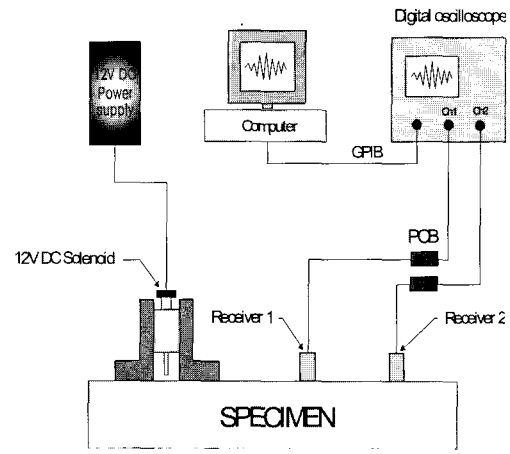

Fig. 16 Schematic diagram of one-sided technique set-up

콘크리트에 AE를 이용한 대표적인 사례는 균열에 대한 것이다[30]. AE는 콘크리트에서 균열이 진전될 때에 발생하는 신호를 수신하여 균열의 위치, 크기, 진전여부 및 종류와 같은 정보를 얻을 수 있다. 여러 개의 AE 센서를 콘크리트 표면에 부착하여 도착시간으로부터 AE 발생원의 위치를 표정할 수 있으며 방출된 AE의 에너지로부터 정성적으로 균열의 크기를 알 수 있다. 지속적인 AE 위치표정을 통하여 결함의 진전 여부를 알 수 있으며, AE 센서에 수신된 신호를 분석함으로써 균열의 정보를 얻을 수 있다. 즉, 파괴에 동반하는 AE 파형의 모멘트 텐서 해석을 행하여 균열이 인장인지 전단인지 파악할 수 있고 그 운동방향도 구할 수 있다.

콘크리트에서 AE의 중요한 응용의 하나는 카이저 효과를 이용하는 것으로서 기존 콘크리트의 이력하중을 추정할 수 있다. 이는 하중을 받은 재료에 다시 하중을 가할 때에 이전에 받은 하중값 이하에서는 AE가 발생하지 않는다는 것으로 강재, 암석 등 많은 재료에 적용이 되며 콘크리트에서도 잘 나타난다. 따라서 콘크리트에 하중을 가하면서 AE가 발생되기 시작하는 하중값이 이력하중으로, 측정오차는 4-12% 정도이다[31].

3.3. 전자파를 사용한 비파괴검사

전자파를 이용한 콘크리트 검사법 중에서 중요한 것으로 레이더, 방사선법, 전자유도법, 열적외선법 등이 있다. 레이더법은 장치가 상용화되어 최근에 사용 빈도가 급격히 늘어난 방법으로 지반조사, 지중 매설물 탐사 및 공동조사에 널리 활용된다. 특히 콘크리트 내부의 철근검사 및 결합부의 검사에 좋은 결과를 얻을 수 있다. 방사선법은 X-선 및 감마선을 이용한 콘크리트 투과시험법으로 철근 및 결합부를 검사하는데 사용된다. 전자유도법은 강재 등 자성체를 탐지하는 방법으로 콘크리트 내의 철근의 위치 및 직경을 검사하는 방법으로서 현장에서 가장 많이 사용되는 방법중 하나이다[32]. 열적외선법은 물체에서 방출되는 열적외선을 검출하여 콘크리트의 박리를 검출하는데 사용된다[33,34].

3.3.1. 철근탐지기

전자유도를 이용한 비파괴검사는 강재와 같은 강자성체에 대해 적용되며, 콘크리트나 비자성체에 의해 영향을 받지 않는다. 이 전자유도를 이용한 비파괴검사는 주로 콘크리트 내의 철근의 위치를 찾아내는데 활용되며 대표적인 장치로는 철근탐지기가 있다. 간단한 철근탐지기의 구성도를 Fig. 17에 나타내었다. 전자유도법을 이용한 검사장치는 기본적으로 평행 공진회로의 전압진폭 감소에 기초를 두고 있다. 일반적으로 사용하는 계측기는 probe의 코일에 전류를 흘려 교류 자장을 만들어내고 그 자장내에 철근과 같은 강자성체가 존재하면 자성체에 의해 새로운 자기장이 만들어진다. 강자성체에 의해 만들어진 자기장에 의해 코일에 전류가 발생하여 결과적으로 코일의 전압이 변한다. 코일 전압의 변화는 자장내의 자성체의 특성 및 거리에 의해 변하므로 철근탐지기는 콘크리트 속의 철근 블러싱, 직경, 위치 등을 구할 수 있다.

철근탐지기는 기본적으로 자장을 만들고 그 변화를 측정하는 probe와 유도된 전류를 검출하는 전자회로로 구성되어 있고, 경우에 따라서는 측정된 전압을 기록하는 recorder가 부착되어 있는 경우도 있다. Recorder를 사용할 경우에는 연속측정을 행하는 경우에 편리하다. 일반적으로 표면에 가장 가까이 위치하는 철근만을 검출하게 되며, 그 안쪽에 존재하는 철근은 방사선법 등 다른 방법을 이용해야 한다. 철근탐지기를 사용하는데 주의할 점은 다음과 같다. 코일에서 거리가 멀어질수록 자성체인 철근에 걸리는 자장의 크기가 작고 유도되는 전류의 세기도 약해지므로 판독이 어려워진다. 여러개의 자성체가 존재할 경우에 인접한 자성체의 영향을 받아서 측정값이 달라질 수 있다. 코일에 흐르는 전압변화만으로는 철근의 직경과 철근까지의 거리를 동시에 측정하기에는 곤란하다.

철근탐지기는 인접한 철근에 의한 영향도 같이 받으므로 너무 큰 자장을 만들어도 측정의 정밀도가 좋아지지 않는다. 철근의 피복두께가 철근의 간격보다 클 경우에

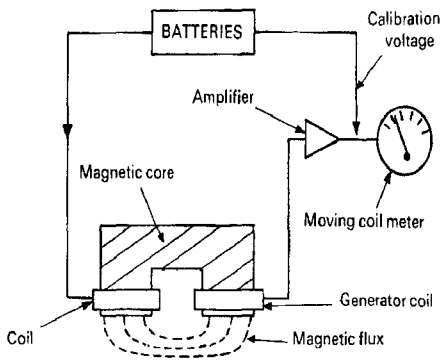

Fig. 17 Typical simple covermeter circuitry

는 이러한 영향을 배제할 수 없다. 오늘날 일반적으로 피복두께가 7cm 이하이고 철근 간격이 그 이상인 것으로 가정하여 철근 탐지기를 만들기 때문에 피복두께가 10cm 이상인 경우에 정밀도는 떨어진다.

코일의 전압변화만 이용하면 강재의 굵기나 거리의 어느 한쪽을 알아야만 하는데, 철근탐지기에 따라서는 같은 장소에서 철근과의 거리를 변화시키면서 철근에 의해 유도되는 전류의 변화를 이용하여 철근의 굵기를 구하는 방법이 사용되기도 한다[35]. 그러나, 이 경우에 철근의 굵기에 따른 전압의 변화가 작아서 판독오차가 커지는 단점이 있다. 최근에는 구동전류와 유도전류 사이에 위상차가 있는 것에 착안하여 철근의 굵기를 위상차에서 구하고 그 후에 철근까지의 거리를 구하는 방법이 연구되고 있다. Fig. 18에 대표적인 위상각과 철근의 직경사이의 관계를 나타내었다.

3.3.2. 전기화학적측정

일반적으로 콘크리트 공극 중의 수분은 주로 포화 수산화칼슘 용액으로 pH 12-13.5 정도이다. 이러한 강알카리성 환경에서 철은 그 표면에 부동태 피막이 형성되지만 콘크리트의 중성화, 염화물 침투, 알카리 골재 반응, 화학적 부식 등으로 철근은 활성태로 되어 부식하기 쉬워진다. 철근에 부식이 발생하여 콘크리트 구조물이 열화하는 초기단계를 검출할 수 있는 유일한 방법은 전기화학적인 방법이다. 이 방법에는 전위측정법, 전기저항법, 분극저항법, 교류임피던스법 등이 있다. 이중에서 자연전위측정법은 원리가 간단하고 특수한 측정장치가 필요하지 않아 ASTM에서는 1977년에 규격화 하였다[36].

전위측정법 : 기준 전극과 전압계를 사용하여 철근의 전위를 측정한다. 기준 전극으로는 주로 구리/황산구리 또는 은/염화은을 사용하나 다른 조합도 사용 가능하다[37]. 전위 측정에는 자연전위 측정법과 표면 전위 측정법이 있다. 자연전위 측정법에는 Fig. 19와 같이 철근에 전압계의 +단자를, 기준전극에 -단자를 연결하고 물에 충분히 적신 기준전극을 측정점에 가볍게 눌러 유지한다. 처음에는 측정값이 계속 변하나 수분간 기다려 안정될 때에 측정치를 읽는다. 이때 읽은 전압이 -0.35 V 이하이면 부식이 있을 가능성이 크고 전압이 -0.2 V이상이면 부식이 없을 가능성이 크고, 전압이 -0.35 ~ -0.20 V 에서는 불확실한 경우이다. 표면 전위차 측정법은 두 개의 기준전극을 콘크리트 표면에 설치하여 전위차를 측정하는 방법으로 전위 구배가 50mV/30cm 이상인 장소는 부식활성 장소로 판정한다. 이 방법은 철근에 단자를 연결하기 위해서 콘크리트를 벗겨낼 필요가 없지만 측정의 신뢰도는 떨어진다[37].

전기저항법 : 비저항이 큰 건조한 콘크리트에서는 철근의 부식이 거의 일어나지 않지만, 비저항이 낮은 습기가 많은 콘크리트에서는 부식이 일어나기 쉽다. 콘크리트의 비저항을 측정하여 콘크리트가 부식환경에 있는지를 판정하는 방법이다. 이 방법은 Fig. 20과 같이 콘크리트 표면에 4개의 전극을 등간격 s 로 배치하고 양 끝의 두 전극에 직류 또는 교류의 전류 I 를 흘려주고 중간의 두 전극에서 측정된 전위차가 V 라 하면 이때 비저항 ρ 는

$$\rho = 2\pi s V/I \qquad (2)$$

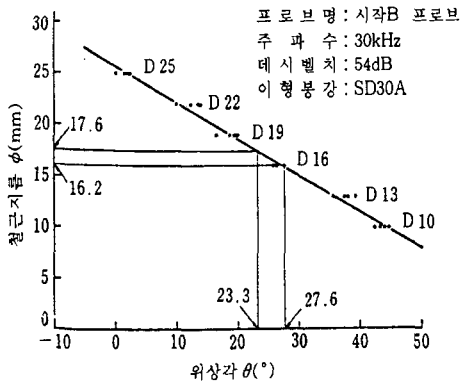

Fig. 18 Relationship between phase angle and rebar diameter

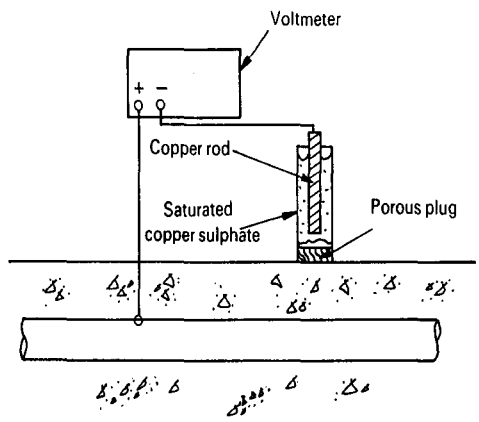

Fig. 19 Reinforcement potential measurement

로 주어진다. 전극 간격은 철근의 영향을 피하기 위해서 피복두께 이하로 하는데, 일반적으로 50mm를 널리 사용한다. 교류법의 경우에 임피던스가 주파수에 의존하므로 100 - 200Hz의 저주파수를 사용하는 것이 좋다. 전기저항이 20kΩ·cm 이상이면 콘크리트의 부식성이 없는 경우로, 5kΩ·cm 이하이면 부식성이 매우 큰 경우로 판정한다[38].

3.3.3. 레이더

지난 10년 동안 토목구조물, 특히 콘크리트 구조물에 대한 연구에 표층 임펄스 레이더를 사용하는 빈도가 높아지고 있다[39]. 특별히 500MHz에서 1GHz사이의 전자파는 토양 내를 전파할 수 있는데, 이때 전자파의 속도와 감쇠는 토양의 전자기적 성질에 따라 달라진다. 전자파의 속도는 유전율에 의해 결정되고, 감쇠는 전기전도도에 의해 정해진다[40]. Fig. 21과 같이 서로 다른 물질의 경계에서 전자파는 반사와 굴절이 일어나고 안테나로 되돌아오는 신호는 표층구조의 정보를 제공해 준다. 콘크리트를 검사하는데 사용되는 레이더 시스템은 크게 FM 방식, synthetic 펄스 레이더, 임펄스 레이더의 세가지가 있는데, 그중에서 임펄스 레이더가 여러 분야에 널리 사용된다.

중심주파수가 1GHz 인 레이더의 경우에 검사할 수 있는 콘크리트의 두께는 50cm 이내이지만 500MHz를 사용할 경우에는 더 두꺼운 콘크리트에도 사용이 가능하다. 주파수를 낮추면 감쇠가 줄어들어 보다 깊은 두께까지 검사가 가능하지만 안테나가 커지고 분해능이 나빠지는 단점이 있다. 콘크리트 표면에 밀착하는 안테나 대신에 집속빔 혼 안테나를 사용하여 콘크리트까지의 거리를 30 cm 정도를 유지할 수가 있다. 이 시스템을 시속 50 km의 속력으로 움직이는 자동차에 싣고 철근 콘크리트 슬래브 내의 박리를 검출한다[41,42]. 이 기술은 잘 정립되어 ASTM에 코드화되어 있다[43].

레이더는 콘크리트 내부에 있는 철근이나 공동을 찾아낼 수 있다. Fig. 22에 전형적인 철근 탐지상을 보여주고 있다. Fig. 22에 포물선 형의 피크가 여러개 나타나는데, 이는 콘크리트 표면과 철근 사이에서 다중 반사의 결과이다. 물체까지의 깊이를 정확히 알기 위해서는 시험체 내부에서의 속도를 알아야 하는데 이는 기본적으로 유전율에 의해 정해지고 유전율은 콘크리트 내의 수분에 의해 영향을 받는다. 비유전율 값은 가정을 하거나 부분적으로 드릴링이나 코어링으로 교정해야 한다. 비유전율 값은 5에서 12사이의 값을 지니고 전자파의 속도, c는

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3}$$

와 같이 주어진다. 여기서 $c_0 = 3\times10^8$ m/s는 진공 중에서의 전자파의 속도이고, ε_r은 대상체의 비유전율이다. 물성을 정확히 안다면 측정깊이의 정밀도는 ±5 mm이다.

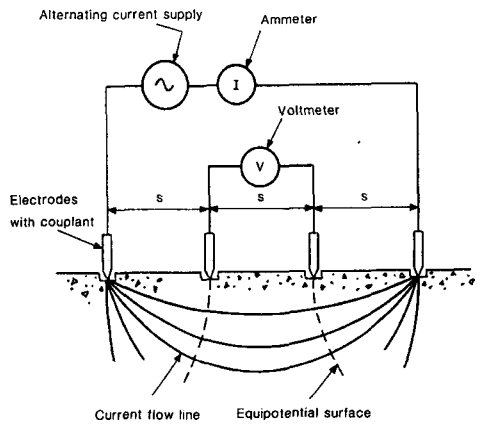

Fig. 20 Four probe resistivity test

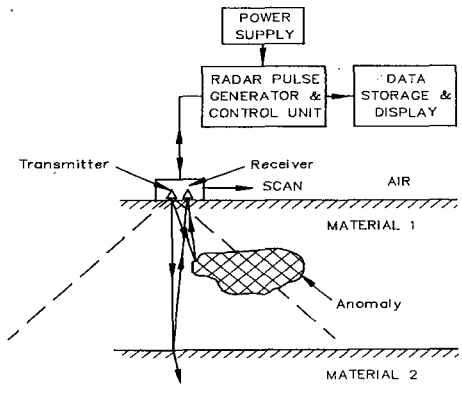

Fig. 21 Investigation of sub-surface anomaly using radar

콘크리트에서는 두께 20cm 이내에 존재하는 공동 및 철근을 탐지할 수 있는 것으로 알려져 있다. 사용하는 주파수 및 출력에 큰 영향을 받아서 주파수가 100MHz 정도를 사용하면 무근 콘크리트에서는 150cm 정도 깊이까지 탐사가 가능한 것으로 보고되었다. 또 1-3GHz 정도의 고주파를 사용하면 분해능은 높으나 전자파의 감쇠가 심하여 탐사 깊이는 20cm 정도이다. 철근이 존재하면 철근에 의해 전자파가 강하게 반사하므로 철근보다 안쪽에 있는 공동의 탐지는 어렵다.

4. 맺음말

이상과 같이 콘크리트의 비파괴 시험법의 기술현황에 대하여 전반적으로 고찰하여 보았다. 근래에 들어서 급격히 늘어나는 콘크리트 구조물의 사용을 감안할 때에 이들의 안전관리는 물론 건설단계에서의 철저한 품질관리를 위하여 콘크리트의 비파괴 시험은 필수적이라 하겠다. 종래에 콘크리트 구조물은 강도만 충분하다면 유지관리없이 반영구적으로 사용할 수 있다고 생각해 왔다. 콘크리트 분야에서 비파괴검사는 주로 콘크리트의 강도를 구하는 것에만 관심이 있었지만, 콘크리트의 내구성 진단을 위해서는 보다 다양한 정보를 필요로 한다. 비파괴검사의 종류는 매우 다양하여 그 원리를 충분히 이해하고 자유자재로 사용하는 것은 매우 어렵다. 그렇다고 해서 원리에 대한 이해없이 상용 장비에서 나오는 측정치를 그대로 사용하는 것은 매우 위험한 일이다. 따라서 사용하고 있는 검사법의 최소한의 원리와 적용범위에 대해서 명료히 이해하고 현장에서 적용해야 할 것이다.

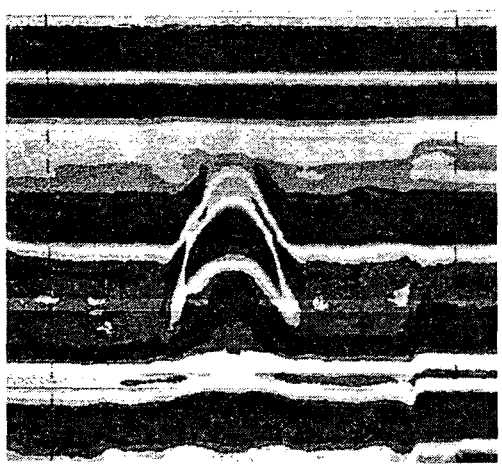

Fig. 22 Radar scan over steel reinforcing bar

참 고 문 헌

[1] Taketo Uomoto, "Maintenance of concrete structures and application of non-destructive inspection in Japan," Proc. Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000, Tokyo, 25-27 April 2000, pp. 1-11

[2] "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", ASTM Standards C39-81

[3] "Ball impact test for normal concrete", Standard code DIN 4240, No. 6

[4] "Test for penetration resistance of hardened concrete", ASTM C 803-75T

[5] B. Tremper, "The measurement of concrete strength by embedded pull-out bars", Proceedings, ASTM, Vol.44, pp.880-887 (1944)

[6] J. Kolek, "An appreciation of the Schmidt rebound hammer", Magazine of Concrete Research (London), Vol.10, No.28, pp.27-36 (Mar. 1958)

[7] "Standard test method for the fundamental transverse, longitudinal and Torsional frequencies of concrete specimens", ASTM Standard C215-60 (1976)

[8] "Measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete", Br. Std. Inst., BS4408, 1947, Part 5, p. 20

[9] "Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer," Br. Std. Inst., BS1881: Part 202

[10] "Rebound number of hardened concrete," ASTM Standard C805

[11] "Recommendations for testing concrete by hardness method," RILEM/NDT-3

[12] M. R. Sharama and B. L. Gupta, "Sonic modulus as related to strength and static modulus of high strength concrete", Indian Concr. J., Vol. 34, No. 4, pp. 139-141 (1960)

[13] B. G. Long and H. J. Kurtz, "Effects of curing methods on the durability of concrete as measured by changes in the dynamic modulus of elasticity", proc., ASTM, Vol. 43, pp. 1051-1065 (1943)

[14] PUNDIT, CNS Electronics Ltd, 61-63 Holmes Rd, London

[15] "Instruction manual for model C-4899 V-meter," James Electronics Inc., Chicago, Illinois

[16] "Recommandations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete," Br. Std. Inst., BS 1881: Part 203

[17] "Standard test method for pulse velocity through concrete," ASTM Standards C597

[18] 이세경 등저, "콘크리트 구조물의 초음파 탐상법 개발 (2차년도)", KSRI-87-45-IR, 한국표준연구소 (1987)

[19] M. Sansalone and N. J. Carino, "Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves," Nat'l Bur. Stds., NBS IR 86-3452, (1986, Gaithersberg, MD, USA)

[20] 김영환, "콘크리트 구조물 시험용 충격-공진 시험기 개발," 1996년도 춘계학술발표회, 한국비파괴검사학회, pp. 125-130, (광주, 1996. 5. 10 - 11)

[21] 김영환,이세경, 김호철, "탄성파 공진법에 의한 기초 콘크리트의 두께측정," 한국콘크리트 학회지, 제3권 3호, pp. 121-128 (1991)

[22] M. Sansalone and N. J. Carino, "Detecting honeycombing, the depth of surface-opening cracks and ungrouted ducts using the impact-echo method," Concr. Int'l, Apr., 1988, pp. 38- (1988)

[23] http://www.impact-echo.com/Impact-Echo/impact.htm

[24] G. Schickert, "NDT-CE symposium Berlin 1995: A concluding review," Proc. Int'l Symp. Nondestr. Test. Civil Eng., Sep. 26-28, 1995, Berlin (1995, DGZfP) pp. 757-776

[25] "Proposed standard practice for measuring the P-wave speed and the thickness of concrete plate using the impact-echo method," submitted to ASTM subcommittee C09.64 in (Dec 1996)

[26] J. Y. Koo, S. Lee, Young H. Kim and H. S. Lew, "Quantitative spectral analysis for flaw detection in Concrete," Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 3, No. 3, pp. 171-182 (Sep. 1991)

[27] Y. H. Kim, S. Lee and H. C. Kim, "Quantitative vibration mode analysis of mortar and concrete blocks containing flaws", NDT Int'l. Vol. 23, No. 2, pp. 67-74 (1990)

[28] 이준현, 송원준, J.S. Popovics, J.D. Achenbach, "콘크리트의 응력파 속도측정을 위한 One-Sided Technique 개발", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집 Vol. 9, No. 1, pp. 537-543, 1997

[29] J.S. Popovics, W.J. Song, J.H. Lee and J.D. Achenbach, "One-sided stress wave velocity measurement in concrete", J. of Eng. Mechanics, Vol 124, No. 12, pp.1346-1353, (1998)

[30] ASTM-E610, "Standard definition and terms relating to acoustic emission," ASTM, Philadelpia, PA (1982)

[31] M. Ohtsu, Y. Tomoda and T. Fujioka, "Estimation of initial damage in concrete by acoustic emission," Proc. 4th FENDT, KSNT, pp. 567-577 (1997)

[32] S. Niiseki et. al., "On the influence of loading velocity and mix proportion on Kaiser effect in concrete," Progress in Acoustic Emission IV, JSNDI, pp. 320-327 (1988)

[33] "Recommendations on the use of electromagnetic covermeters," Br. Std. Inst., BS1881: Part 204

[34] F. B. Holt and J. W. Eales, "Non-destructive evaluation of pavement," Concrete International, Vol. 9, No. 6, June 1987, pp. 41-45

[35] "Detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography," ASTM Standards D4788

[36] J. C. Alldred, "An improved method for measuring reinforcing bars of unknown diameter in concrete using a covermeter," Proc. Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Br. Inst. NDT, pp. 767-788, 1993

[37] "Half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete," ASTM Standards C876

[38] J. W. Figg and A. F. Marsden, "Development of inspection techniques - a stateof the art survey of electrical potential and resisitivity measurements for use above water level," Offshore Technology Report, OTH 84 205, HMSO, London, (1983)

[39] P. Langford and J. M. Broomfield, "Monitoring the corrosion of reinforcing steel," Construction Repair, Vol. 1, No. 2, Palladian Press, pp. 32-36, May (1987)

[40] T. R. Cantor, "Review of penetrating radar as applied to the non-destructive testing of concrete," Spec. Publ. SP 82-29, ACI, Detroit, pp. 581-602, (1984)

[41] J. H. Bungey and S. G. Millard, "Radar inspection of structures," Proc. ICE Structs & Bldgs, Vol. 99, May 1993, pp. 173-186

[42] C. R. Carter, T. Chung, F. B. Holt and D. G. Manning, "An automated signal processing system for the signature analysis of radar wave forms from bridge decks," Can. Elect. Eng., Vol. 11, No. 3, pp. 128-137, (1986)

[43] K. R. Maser, "Bridge deck condition survey using radar," Transport Research Board, Paper 91-0530, pp19, (1991)

[44] "Determining the thickness of bound pavement layers using short pulse radar," ASTM Standard D4748