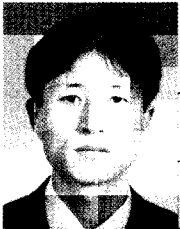


초음파 속도측정 방법과 그 응용



원 순 호

(KIMM 시험평가부)

- '93 한양대학교 물리학과
- '95 한양대학교 대학원 물리학과(석사)
- '95. 3-현재 한국기계연구원 연구원



장 홍 군

(KIMM 시험평가부)

- '63. 2 한양대학교 공과대학 원자력공학과
- '63. 5~'69. 1 한국원자력연구소 연구원
- '69. 2~'79. 8 한국공업검사 상무이사
- '76. 12/84. 8 방사선관리/비파괴검사기술사
- '87. 8 부경대학교 대학원 기계공학과(석사)
- '97. 8 부경대학교 대학원 기계공학과(박사)
- '79. 9-현재 한국기계연구원 책임연구원



조 경 식

(KIMM 시험평가부)

- '78. 2 서울공대 공업교육과(기계전공)
- '93. 2 창원대학교 대학원 기계공학과(석사)
- '87. 8 비파괴검사 기술사
- '77. 12-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

물체를 가로지르는 음향파의 전파는 대상물질의 탄성에 크게 의존한다. 그러나 탄성은 고체마다 다르기 때문에 초음파의 전파특성이 다른 고체내에서 모두 다르다고 예측할 수 있다. 따라서 재질내에서의 음향속도를 측정할 수 있다면 특별한 재질의 탄성적 성질을 측정할 수가 있다. 또한 음향속도의 측정으로 금속재료 내의 상변태 양상도 유추할 수 있다는 논문이 보고되고 있다. 본 고에서는 재료의 물리적 성질을 연구하는데 유용한 수단으로 평가받고 있는 초음파속도 측정방법과 그 응용에 대하여 고찰해 보았다.

2. 속도측정 방법

2.1. Pulse-Echo-Overlap 방법

Pulse-Echo-Overlap(PEO) 방법은 매우 다용도적이고 초음파 속도측정에 있어서 높은 정확성을 가지고 있다. 절대치 측정에 대한 정확성은 한 에코의 주기에서 다음 에코의 일치하는 주기까지 얼마나 정확하게 측정할 수 있는가 하는 사실에 달려있고 빔분산에 대한 적절한 보정을 할 수 있기 때문에 대부분의 다른 방법보다 월등한 정확성을 가지고 있다. 또한 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

- (1) 시편과 탐촉자를 직접적으로 결합 또는 buffer rod를 사용하여 측정할 수 있다.
- (2) 광대역 펄스를 사용할 수 있기 때문에 명

확한 에코에 대해 적절한 중첩을 시킬 수 있다.

- (3) 투과법을 적용할 수 있다.
- (4) 군속도와 위상속도를 측정할 수 있는 한 방법이다.

한 단점은 에코의 중첩을 직접 조작하여야 하기 때문에 자동화가 불가능하다는 점이다.

2.1.1. Pulse-Echo-Overlap 시스템

PEO 측정을 위한 시스템의 구성은 그림 1.에 보여지는 바와 같다. 측정의 원리는 원하는 두 신호 사이의 시간을 이용해 오실로스코프상에 두 신호를 중첩시키는 것이다. 이때 한 신호는 오실로스코프의 한 sweep에 나타나고 다른 신호

는 다음 sweep에 나타난다. x축 sweep 주파수는 그림 1에 보여지는 cw 진동자에 의해 조절되고 측정되는 신호들은 cw 전압의 위상과 일치되게 하여야 신호의 떨림을 막을 수 있다. 주파수 분배기의 출력은 cw 전압의 위상과 일치되도록 신호를 동기시킨다. 동기된 신호는 주 송신자를 동기시키고 이것은 다시 탐촉자를 진동시킨다. 다이오드 제어회로는 증폭기에 과부하가 걸리는 입력펄스를 제어하고 주 송신자는 측정되는 두 신호를 나머지 신호와 구별시키기 위해서 측정 신호를 동기시킨다. 중첩은 cw 주파수를 조절하여 가능하고 결과적으로 주기는 측정되는 두 신호사이의 시간과 일치하게 된다. 이때 cw 주파수는 주파수 카운터로부터 계산되고 왕복시간은

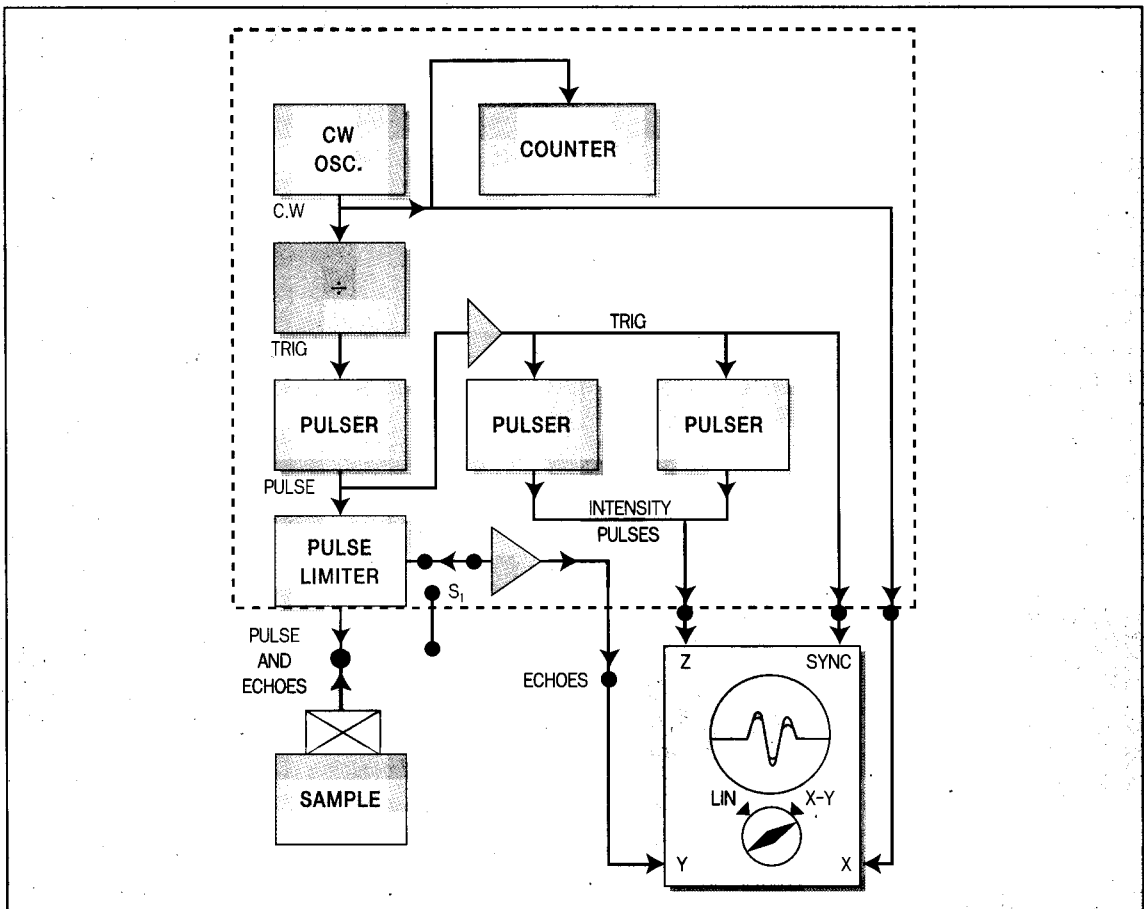


그림 1. Pulse-Echo-Overlap을 이용한 속도측정 시스템의 구성

이것의 역수로 구해질 수 있다. 그림 2에 두 신호가 중첩되도록 cw 주파수가 조절된 것을 보여 준다.

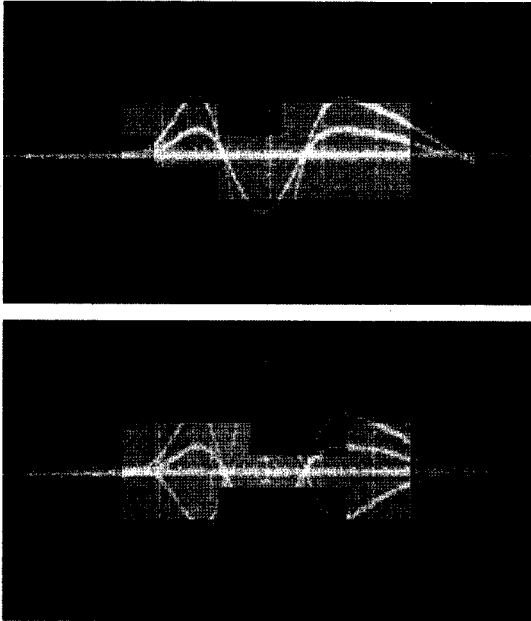


그림 2. Pulse-Echo-Overlap 시스템을 사용하여 중첩시킨 광대역 신호

PEO 방법의 적용범위를 살펴보면 표 1과 같이 요약될 수 있다.

표 1. Pulse-Echo-Overlap 방법의 적용범위

Pulse type	Multiple echo		Through-Transmission
	Direct bond	Buffer rod	
Broadband	Yes	Yes	Yes
rf pulse	Yes	Yes	Yes ¹⁾

주 1) 위상속도와 균속도 측정에 모두 적용가능

2.1.2. 정밀도와 정확성

측정의 정밀도는 pulse-echo를 정확하게 중첩시킬 수 있는 측정자의 시각적인 능력에 달려있다. 위상이 1° 이내라도 오차범위는 주기의 1/100 정도이고, 또 다른 오차는 중첩을 설정할 때의 ±1정도의 카운트 오차이다.

2.1.3. 응용

이 방법은 금속 강종에서 다중신호 사이의 시간을 측정하는데 처음 사용되었다. 일정한 온도(1550°F)로 austenitizing 하고 pearlite+ferrite, bainite, martensite와 같이 서로 다른 조직을 얻기 위해 다른 속도로 냉각시킨 3개의 medium alloy steel(SAE 4150)에서 위상속도를 구하였다. 10MHz, 1.27cm diam. 수정 탐촉자를 salol을 접촉 매질로 사용하여 횡파와 종파에 대한 초음파 속도를 측정하였다. martensite는 재가열하여 다시 측정한 결과 종파는 1%, 횡파는 2%, 밀도는 3%의 변화를 나타내었다. 요약된 결과는 표 2와 같다.

표 2. 강의 미세조직에 따른 초음파 속도

Specimen	Density (gm/cm ³)	Velocity(cm/μsec)	
		Longitudinal	Transverse
Pearlite-plus-ferrite	7.8134	0.59446	0.32522
Bainite	7.8091	0.59157	0.32360
Martensite	7.7865	0.58796	0.31953
Tempered martensite	7.7957	0.59047	0.32159

Papadakis는 거리에 따른 회절로 인해 발생하는 초음파빔의 위상변위를 연구하기 위하여 PEO 방법을 사용하였다.^[1] 15MHz와 20MHz X-cut 수정 탐촉자를 사용하여 특정 시료로부터 종단시간(t_M)을 측정하였다. 단조로운 경향이 데이터에서 구해졌고 왕복시간에 대한 값들이 평균화되었다. 최종적으로 회절에 대한 위상보정이 계산되었고 표준편차값은 표 3과 같았다.

금속학적 연구에 대한 또 다른 응용은 소입한 medium alloy steel(SAE 52100)에서 초음파 속도가 온도의 함수라는 것을 보였다. 이것은 고온에서 다른 혼합물이 탄화물로 변했기 때문이다. Austenitizing온도로부터 275°C 증가시켰을 때 속도는 0.6%의 변화를 보였다.

이 외에 현재 다양한 연구가 PEO 방법을 응용해서 진행 중에 있으며 본 방법으로 재질내의 음향속도를 측정하는 실험을 그림 3에 나타내었다.

표 3. 종단시간에 대한 위상보정 전, 후의 표준편차

Specimen	Standard deviation(μ sec)	
	Uncorrected	Corrected
1 in. Fused quartz	0,00016	0,00013
2 in. Fused quartz	0,00015	0,00010
[100] Silicon	0,00021	0,00017
[110] Silicon	0,00014	0,00008
[111] Silicon	0,00021	0,00012

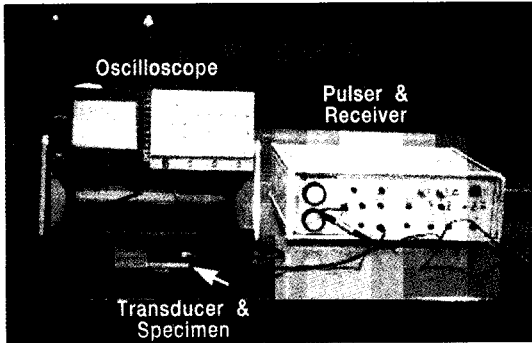


그림 3. Pulse-Echo-Overlap 방법을 이용한 실험

2.2. Pulse Superposition 방법

Pulse Superposition(PS) 방법도 속도측정방법

으로 뛰어난 정확성을 갖고 있다. 단지 PEO 방법과 같이 buffer rod나 광대역 펄스에서는 사용될 수 없는 단점을 갖고 있다. 그러나 피드백 기능으로 자동화가 가능하며 절대값 측정에 대한 정확성은 한 신호의 주기로부터 일치하는 다음 신호의 주기까지 정확하게 측정할 수 있다는 사실에 있다.

2.2.1. Pulse Superposition 시스템

이 방법에 대한 구성은 그림 4와 같다. 한 개의 탐촉자를 시료에 사용하여 다중신호를 관찰한다. 먼저 radio frequency(rf) 펄스발생기는 시료에서 파가 한번 왕복하는데 한번 탐촉자를 진동시키며 이 진동자의 주기가 시료에서의 왕복 시간과 동일하도록 조정되어 있다. 그러므로 rf 발생기는 시료에서 초음파가 한번 왕복하는데 한번 진동되어진다.(cw 진동자의 주파수는 rf 펄스발생기의 주파수와 완전히 무관하다) cw 진동자의 주파수는 주파수 카운터로 계산되고 cw 주파수의 역수가 시료에서 rf 펄스의 종단시간이다. 이 방법의 명명은 초음파 펄스들이 시

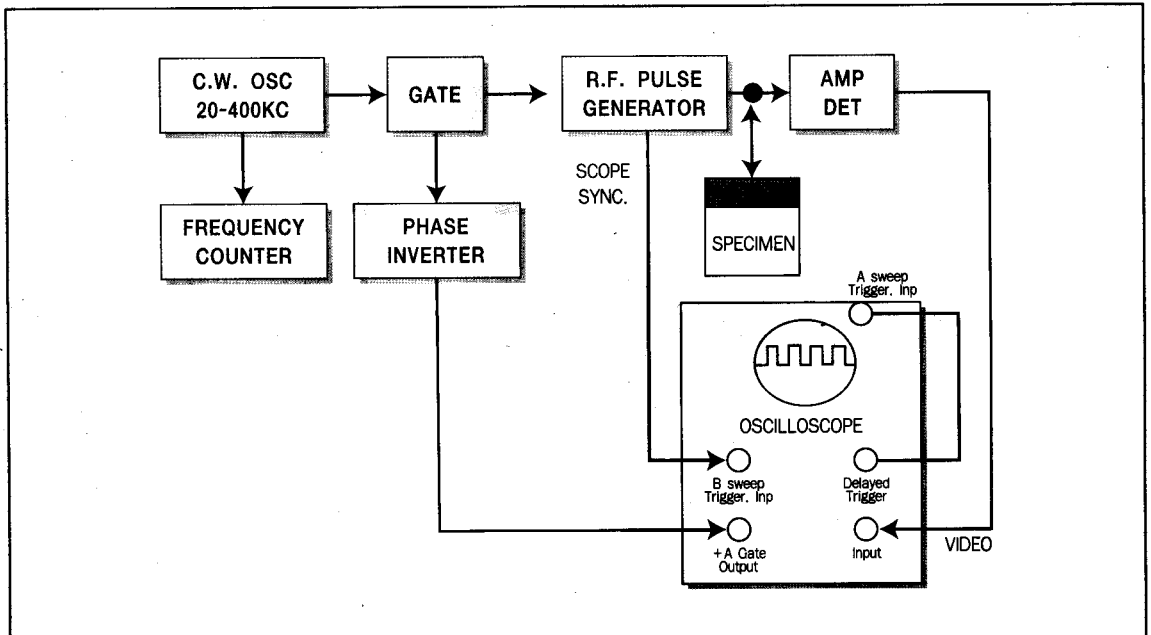


그림 4. Pulse Superposition 방법을 이용한 속도측정 시스템의 구성

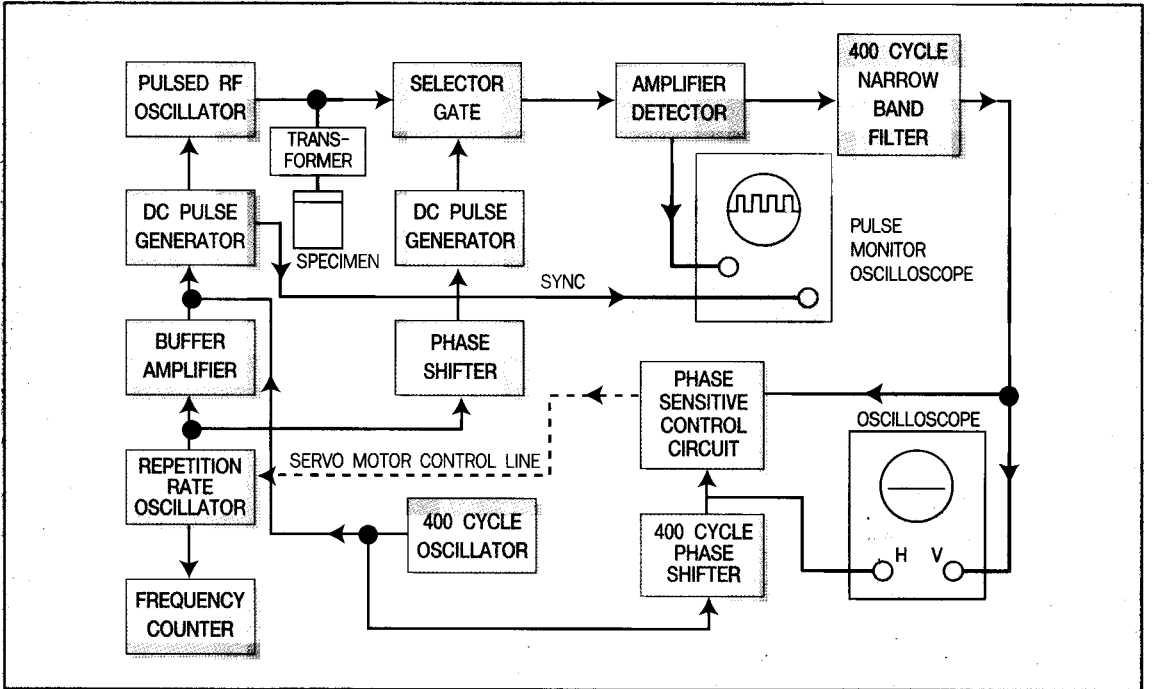


그림 5. Pulse Superposition 방법의 자동화

료 내에서 실제로 겹쳐지기 때문에 붙여진 것이다.

반복주파수(cw 진동자)가 횡단시간의 역수로 설정되어 있을 때, 중첩된 신호에서 최대가 일어나며 또 다른 최대값은 횡단시간에 있어서 cw 진동자의 주기가 rf 주파수와 한 주기만큼 차이가 날 때 일어난다.

그림 4에 나타낸 증폭기와 검출기 회로에서는 rf 펄스발생기의 작동으로 과부하가 되기 때문에 펄스발생기가 한 주기동안 억제되어야만 중첩을 검출할 수 있다. 이것은 +A 게이트 출력과 위상 변환기의 기능으로, 게이트는 cw 진동자와 rf 펄스발생기사이의 동기선에 삽입된다. 이 게이트는 정상적으로는 열려있지만 오실로스코프로부터의 +A 게이트 출력에 의해서 주기적으로 닫혀지며 게이트가 닫혀졌을 때 rf 펄스발생기에 수신되는 동기된 신호와 시료에서 나오는 새로운 신호는 없다. 시료에서의 초음파신호는 이미 감쇠로 인해 없어지지만 그렇게 되는 동안 중첩

되는 것처럼 관찰되는데 이러한 간섭조건 아래 에코들의 최대진폭을 얻을 수 있다. 즉 게이트가 닫히기 바로 전의 cw 주파수의 주기가 시료의 종단시간과 동일하게 되는 것이 최적간섭에 대한 조건이다. 그 cw 주파수가 측정을 위해 계산된다. 감쇠된 에코들은 rf 발생기가 닫히면서 주기적으로 관찰되며, cw 진동자의 주파수는 감쇠된 연속적인 에코들이 최대가 될 때까지 조절되고 탐측자의 공명주파수 f_c 와 또 다른 주파수 $0.9 f_c$ 에서 측정이 이루어진다.

2.2.2. 정밀도와 정확성

PS 방법에서는 에코의 주기와 주기를 일치시킬 수 있기 때문에 속도의 절대값에 대한 측정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 절대값 측정에 대한 정확성의 정도는 빔분산이나 시료와 탐측자사이의 위상변이 등 여러 가지 시스템적인 오차로부터 매우 복잡하게 되지만 일반적으로 10^{-6} 차원의 정확성을 기대할 수 있다.

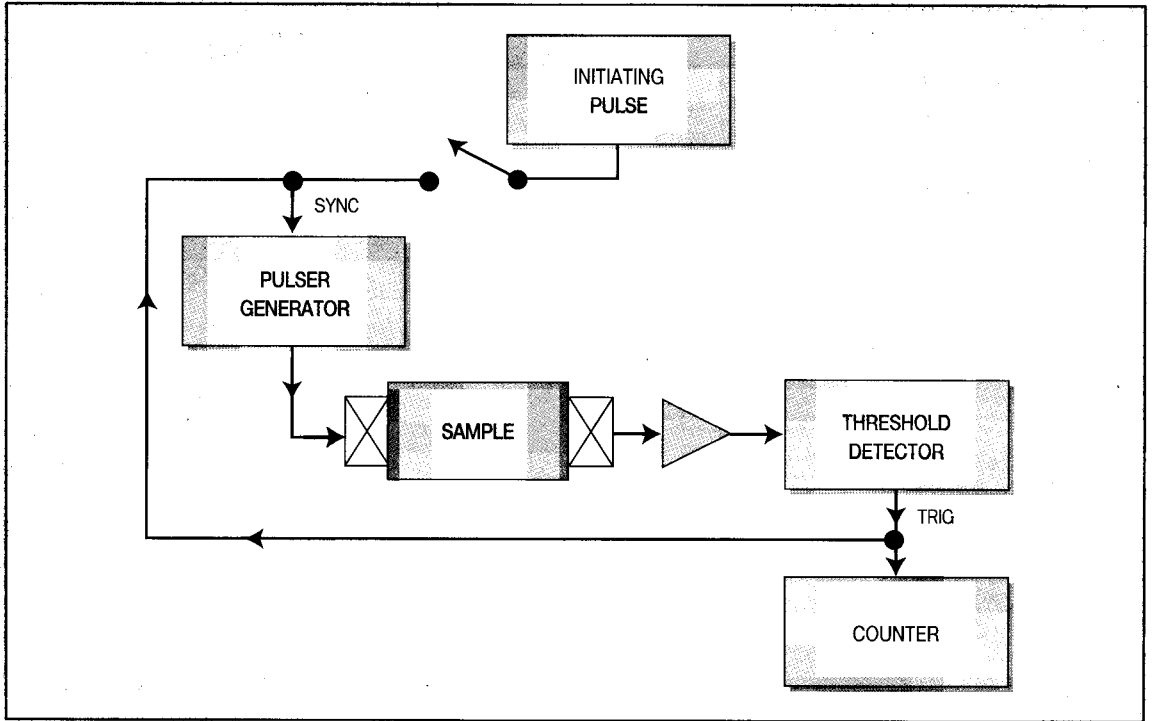


그림 6. 초음파 속도측정을 위한 Sing-Around 시스템의 구성

2.2.3. Automatic Monitoring

McSkimin은 PS 방법의 자동화^[2]를 위한 연구를 수행하여 정밀도를 향상시켰다.^[3] rf 펄스의 반복율을 변조시키는 복잡한 방법으로 증첩된 에코중의 간섭 진폭을 변조시키도록 하였다. 반복율을 중앙으로부터 올리고 내림에 따라 진폭이 감소되었고 진폭 대 반복율에 대한 곡선의 기울기는 반복율의 주파수를 조정하기 위한 피드백 루프에 사용되었다. 이 시스템에 대한 도형적 해석은 그림 5와 같다.

2.2.4. 응용

McSkimin과 동료연구자들은 단결정 게르마늄[100]을 포함한 몇몇 재료에서 초음파속도를 측정하였고 이 측정에서 위에서 언급한 시스템적인 오차를 고려하지 않았을 때 $\pm 1/5000$ 의 오차를 보였다. 또한 수정에 대해서 $-198^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 사이의 온도와 $1 \sim 2000\text{atm}$ 의 사이의 수압에

대해서 측정된 결과 표준값에 대해 10^{-5} 의 표준편차를 나타내었다. 단축방향의 압축에 대한 수정과 실리콘으로부터의 측정값은 표준값에 대해 10^{-6} 의 오차를 보였고 이러한 측정값은 재료의 3차 탄성계수를 결정하는데 사용되었다.^[4]

또한 자동시스템을 개선하여 실리콘과 게르마늄의 단축방향의 압축에 대해 파속을 측정하였는데 측정값은 표준값에 대해서 2×10^{-7} 이내의 표준편차를 나타내었다.

2.3. Sing-Around 방법

Sing-around 시스템은 자동화된 초음파 속도 측정 방법으로 매우 높은 정확성과 함께 초음파 속도의 변화를 감시할 수 있다.^[5]

이 방법은 절대값을 측정하기 위한 이상적인 방법이지만 시료의 형상이 다른 방법에 적용될 수 있다면 상대적인 측정방법으로도 매우 유용

하다. 측정은 두 개의 탐촉자를 이용한 투과법 (through-transmission)을 사용하여야 한다.

2.3.1. Sing-Around 개념

이 방법의 실험구성으로 가장 간단한 형태는 그림 6에 보여진다. 송신자가 송신탐촉자에 전기적 펄스를 주고 결과적으로 시편에서는 기계적인 파를 발생시킨다. 이 파는 수신탐촉자에서 수신되고 증폭된다. 수신되어 증폭된 신호는 새로운 펄스를 발생시키는 송신자의 동기신호를 발생시키는데 사용된다. 이 루프는 연속적으로 구동되고 동기신호의 발생주파수는 주파수카운터에 의해 측정된다. 결과적으로 루프를 통한 종단 시간은 단위시간당 카운트된 동기신호 수의 역수이다. 그러나 루프를 통한 종단시간은 송신자의 동기화나 증폭된 펄스의 발생시간, 동기신호의 발생 등과 관련된 전기적인 지연 때문에 시편을 통과하는 종단시간보다 크다. 따라서 절대값 측정을 위해서 10^{-4} 이상의 정확성을 요하는 시스템에서는 이러한 모든 지연 등에 대한 보정이 있어야 한다.

2.3.2. 응용

Sing-around 시스템은 바나듐이 초전도상태로 될 때 [110] 방향의 종파에 대한 탄성계수 ($C_{11} + C_{12} + 2C_{44}$)/2의 변화를 측정하는데 사용되었다.^[6]

탄성계수의 변화는 9.8×10^{-5} 로 측정되었고, 재현성은 10% 이내였다. 다결정 금에 대해서도 탄성계수에 대한 와전류의 효과를 규명하기 위하여 이 방법이 사용되었다.^[7] 또한 전도전자의 페르미 표면과 deHaas-van alphen 진동에 관한 연구, 절대영도 근처에서의 격자의 운동, 저온에서 순금속에 대한 전위와 방사손상^[8] 등의 연구에 매우 유용한 것으로 밝혀졌다.

2.4. Phase Adjustment 방법

천천히 변화하는 rf 주파수를 변화시켜서 초음파

의 속도를 측정할 수 있는 방법이다. 중요한 것은 rf 주파수의 변화로 탐촉자가 초음파의 반사에 포함되어져 있거나 공명 없이 구동되었을 때, 그리고 가변주파수(variable-frequency)의 사용에서는 위상보정이 따라야 한다는 것이다. 특기할 만한 장점은 rf 주파수를 직접적으로 카운트할 수 있다는 것이다. 또한 위상탐지기가 기준 파형으로 cw를 사용할 수 있기 때문에 노이즈로부터 식별할 수 있고, 특히 단결정과 같이 얇은 시료나 두께방향에 있어서 박판금속의 rf 측정에 우수하다. 이러한 응용방법으로 다음과 같은 기법이 있으며 수학적 고찰이 따라야 하기 때문에 자세한 설명은 생략한다.

- π -Point Method
- Gated Twin Bursts
- Phase-Coherent Detection
- Velocity by π -Point Variant

이상에서 언급한 방법 외에 자동측정 시스템^[9]이나 rf burst를 이용한 속도측정 방법^[10] 등으로 여러 가지가 있으나 특히 정확한 절대치 측정이 요구되는 때에는 PEO방법이 가장 좋은 방법으로 고려된다.

3. 결 론

지금까지 정확도면에서 매우 우수한 방법으로 평가받는 초음파 속도측정 방법을 살펴보았다.

이러한 방법들은 시편의 등방성만 보장이 된다면 절대값 측정을 보장할 수 있으며 측정값을 이용하여 재료를 비파괴적으로 평가할 수 있는 매우 유용한 물리적 변수들을 구할 수 있다. 그러나 실제의 많은 재료들이 비등방 매질이며, 또한 측정오차에 기여하는 많은 변수들이 존재하고 있다. 따라서 실험적인 관점으로부터 다음과 같은 사항이 결론지어질 수 있다.

대부분의 많은 경우에 시편은 어떤 면에서 충

분히 비등방매질이어서 언급된 방법들 중 특정한 것만이 속도측정의 다양성에 관한 연구에서 충분한 정확성을 제공할 것이다. 측정은 여러 위치에서 수행되어야 하고, 만약 시료 내에서의 측정오차가 사용한 방법의 고유 오차보다 크다면 이때의 값은 무의미한 것으로 결론지을 수 있다. 또한 시간지연이나 회절, 위상변위 등 오차에 기여하는 불분명한 변수들을 규명하는 경험적인 방법도 연구되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] E. P. Papadakis, J. Acoust. Soc. Am., 42, 1967, 1045.
- [2] H. J. McSkimin, J. Acoust. Soc. Am., 37, 1965, 864.
- [3] H. J. McSkimin and P. Andreatch, J. Acoust. Soc. Am., 41, 1967, 1052.
- [4] K. Brugger, J. Appl. Phys., 36, 1965, 767.
- [5] N. P. Cedrone and D. R. Curran, J. Acoust. Soc. Am., 26, 1954, 963.
- [6] J. D. Livingston, Phys. Rev., 129, 1963, 1943.
- [7] G. A. Alers and P. A. Fleury, Phys. Rev., 129, 1963, 2424.
- [8] G. A. Alers and R. T. Swim, Phys. Rev. Lett., 11, 1963, 72.
- [9] L. L. Lacy and A. C. Daniel, J. Acoust. Soc. Am., 52, 1972, 189.
- [10] R. J. Blume, Rev. Sci. Instrum, 34, 1963, 1400.