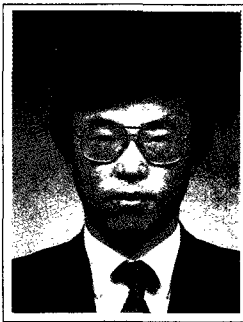


# 원자로 잡음 해석 기술 정보 교환

김 태 룡

한전 전력연구원 기계공학연구소  
구조역학그룹 그룹장



가장 권위있는 회의로서, 원자로 잡음 해석의 이론적인 개발뿐 아니라 각국의 연구 결과와 경험 사례를 발표·토론하고 상호 의견 및 정보를 교환하며 향후 연구 개발의 방향을 설정하는 회의체라 할 수 있다.

가장 최근에 있었던 제7차 회의는 95년 6월 프랑스 문화·예술의 도시 아비뇽에서 열렸으며, 한국에서는 필자를 포함하여 7명이 참여한 바 있다.

SMORN이 열리지 않는 해에 열리는 것이 바로 IMORN(Informal Meeting on Reactor Noise)이다.

IMORN은 이름 그대로 SMORN에 비해 informal한 회의로 연구 결과의 발표보다는 토론과 향후 연구 테마의 도출 등에 더 치중하는 회의이다.

제27차 IMORN은 97년 11월 18일에서 20일까지 스페인의 발렌시아에서 12개국 40여명의 전문가들이 참여한 가운데 개최되었으며, 한국에서는 필자만이 참석하였다.

본 회의에서는 필자의 「한국에서의 중성자 잡음 감시」를 포함하여 총 44편의 논문이 발표되었다.

특히 제1차 SMORN부터 이 회의를 주관하여 온 독일 하노버공대의 Stegemann 교수는 「원자로 잡음 해석의 어제와 오늘 그리고 내일」이란 주제 발표를 통하여 25년간의 원자로 잡음 해석 분야의 연구 성과를 돌아보고 앞으로의 전망 및 발전 방향을 제시하였다.

## 원자로 잡음 해석

원자로 잡음 해석 기술이란 원자로 보호 및 제어 계통 신호, 즉 압력·온도·유량·중성자속 신호 등의 변동(AC 성분), 신호와 진동 및 음향 신호들에 구조적·열수력학적 특성 정보가 내포되어 있음을 착안하여 이들 신호들을 처리·분석하여 결함을 조기에 탐지하고자 하는 기술이다.

원자로 잡음 해석은 47년 F. de Hoffman이 원자로 출력에 미소 변

우리 나라가 얼마 전에 가입한 선진국 모임인 경제협력개발기구(OECD)산하의 원자력기구(NEA)에서는 원자력발전소 운영의 효율성을 제고하고 예방 점검을 함으로써 원전의 가동률을 향상시키기 위하여 이와 관련된 학회(Specialist Meeting on Reactor Noise, SMORN)를 정기적으로 개최하고 있다.

73년부터 3년 주기로 개최되는 SMORN은 원자로 잡음 해석에 관한

동이 있으며 이는 중성자의 연쇄 반응에 기인함을 밝힌 것이 최초이다.

이후 58년에 원자로 출력이 있는 상태에서의 중성자속 변동 성분, 즉 중성자 잡음으로부터 원자로의 열수력학적 상태에 관한 정보를 추출할 수 있음이 밝혀졌다.

그 후 많은 연구·개발을 통하여 원자로 내부 구조물의 구조적 건전성을 진단하거나, 노심의 열수력학적 특성 변화를 탐지할 뿐만 아니라, 원자로의 열수력학적 모델링 및 동력학적 모델링에도 활용되고 있다.

〈표 1〉은 원자로 잡음 해석의 대표적인 응용 분야를 나타낸 것으로, 이때 사용되는 잡음 신호도 매우 다양하여 중성자속·변위·속도·가속도·소음·압력·온도 등이 있으며, 이 중 가장 많이 이용되는 것이 중성자속 잡음 신호이다.

응용 분야 중 가장 두드러지는 것이 원자로 계통의 각종 기기 및 구조물의 구조적 건전성을 주기적으로 감시·진단하여, 결함을 조기에 탐지하고 예방 보수를 수행하는 것이라 할 수 있다.

원자로 내의 구조물 및 핵연료는 고온·고압의 유체(냉각재) 흐름 때문에 항상 진동하게 되며 이를 유체 유발 진동이라 한다.

가압 경수로에서 관측되는 유체 유발 진동 현상의 대표적인 것으로는 〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 압력 용기(Pressure Vessel), Core

〈표 1〉 원자로 계통에서의 잡음 해석 응용 분야

| 활용 분야          | 측정 신호      | 현상                                      |
|----------------|------------|---|
| Core Barrel 진동 | N          | 원자로 용기와 CSB 사이의 물의 두께 변화에 의해 노의 중성자속 변화 |
| 핵연료 진동         | N          | 노내 중성자속 검출기와 핵연료간의 상대 운동으로 노내 중성자속 변화   |
| 원자로 용기 진동      | D, V, A    | 원자로 용기 외부에 설치된 가속도계 신호의 변화              |
| Loose Parts    | S          | 원자로 용기 및 증기발생기 등에 설치된 마이크로폰에 전달되는 충격 신호 |
| 비등 현상 탐지       | N, P, S, T | 비등 현상에 의한 공기 방울로 국부적인 랜덤 신호             |
| 동적 모델링         | F, N, P, T | 각 신호간의 전달 함수 변화                         |

주 : N : 중성자, D : 변위, V : 속도, A : 가속도, S : 음향, P : 압력, T : 온도, F : 유량

〈표 2〉 국내 원전의 NSSS 건전성 감시 계통

| 원 전  | MWe   | 감시 계통 |      |      | 상업 운전 시작일 |
|------|-------|-------|------|------|-----------|
|      |       | IVMS  | LPMS | ALMS |           |
| 고리 1 | 587   | -     | -    | ●    | 78. 4     |
| 고리 2 | 650   | -     | -    | ●    | 83. 7     |
| 고리 3 | 950   | -     | ●    | ●    | 85. 9     |
| 고리 4 | 950   | -     | ●    | ●    | 86. 4     |
| 영광 1 | 950   | -     | ●    | ●    | 86. 8     |
| 영광 2 | 950   | -     | ●    | ●    | 87. 6     |
| 영광 3 | 1,000 | ●     | ●    | ●    | 95. 2     |
| 영광 4 | 1,000 | ●     | ●    | ●    | 96. 1     |
| 울진 1 | 950   | ●     | -    | ●    | 88. 9     |
| 울진 2 | 950   | -     | -    | ●    | 89. 9     |
| 울진 3 | 1,000 | ○     | ○    | ○    | 시운전중      |
| 울진 4 | 1,000 | ○     | ○    | ○    | 건설중       |

주 : 1. ● : 설치 ○ : 설치 예정

2. IVMS : 원자로 내부 구조물 진동 감시 계통(Internals Vibration Monitoring System)

3. LPMS : 금속 파편 감시 계통(Loose Parts Monitoring System)

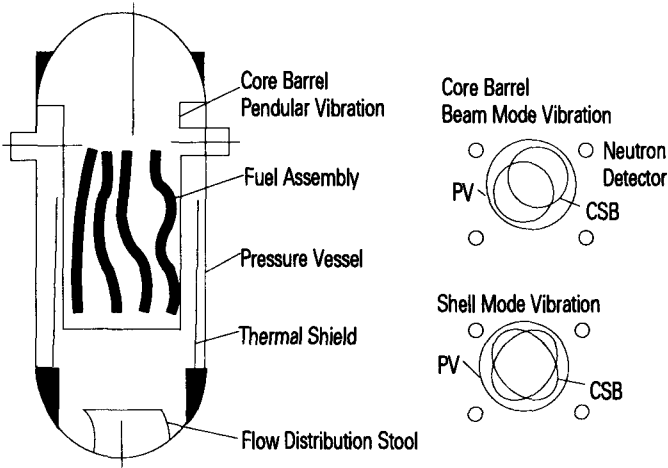
4. ALMS : 음향 누설 감시 계통(Acoustic Leak Monitoring System)

Barrel, 열차폐체(Thermal Shield), 핵연료 집합체의 진동 등이 있다.

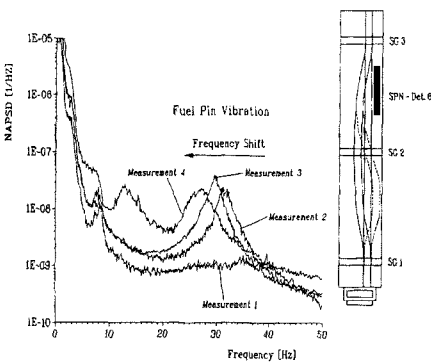
이 유체 유발 진동으로 인하여 내부 구조물간의 체결력이 저하되기도

하고, 체결 부품이 이탈되어 냉각재 유로를 따라 이동하여 다른 기기에 손상을 입히기도 한다.

그 일례로, 〈그림 2〉는 독일의 원전에서 발생하였던 핵연료 집합체의



〈그림 1〉 PWR 내부의 진동 현상



〈그림 2〉 핵연료 지지 격자의 손상시 증성자 신호의 변화 사례

Spacer Grid의 손상에 따른 증성자속의 변화를 보인 것이다(국내 원전은 아직 젊어 결함의 예를 찾기 어렵다). Spacer Grid는 여러 개의 핵연료 핀을 서로 묶어 집합체로 만드는 역할을 하는 부품으로, 이것이 건전하면 운전중 핵연료 핀의 특성 주파수는 일정하게 유지된다(이 경우 70

Hz임).

그러나 이것이 손상되면(〈그림 2〉의 SG2) 그 부위의 강성이 낮아지므로 핵연료 핀의 특성 주파수는 점점 낮아지게 된다(이 경우 27Hz까지 낮아짐).

이 현상은 추후 부러진 Spacer Grid를 찾게 되어 확인되었다.

또 잡음 신호 계측에 사용되는 센서 자체의 건전

성도 진단할 수 있다.

〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 증성자속 검출기(Self-Powered Neutron Detector, SPND)가 건전할 경우에는 주위 구조물의 진동이나 자신의 진동 특성을 나타내게 되나, 손상되면 완전한 랜덤 스펙트럼을 보이게 되므로 자기 진단에 의한 손상

여부를 진단할 수 있고 계측기의 교체 여부를 판단할 수 있게 된다.

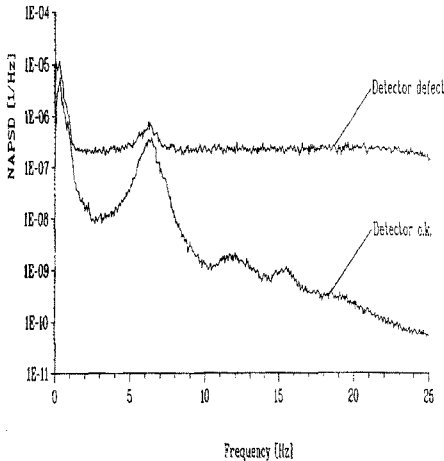
최근 들어서는 잡음 해석 기술에 관한 연구와 더불어 결함 진단의 신뢰도를 높이고 진단의 편이성을 도모하기 위하여 결함 진단의 자동화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국 Westinghouse는 88년에 ADPMS(Advanced Diagnosis and Predictive Maintenance System) 개발이 실용화되어 일부 감시 계통을 발전 설비에 설치·운영하고 있으며, 독일 Siemens/KWU는 86년에 FAMOS(Fatigue Monitoring System), KÜS(Loose Part Monitoring System), SÜS(Vibration Monitoring System), ALÜS(Acoustic Leak Monitoring System)를 개발하여 원전 설비에 장착하였고, 프랑스의 Framatome은 FLAVIA(Loose Part, Leak, Crack and Vibration Monitoring System)를 88년에 개발하여 원전에 설치·운영 중에 있다.

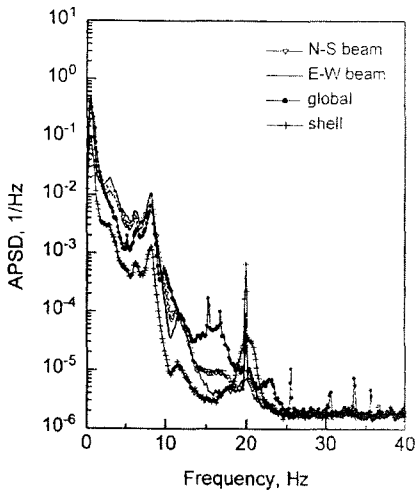
국내 현황

국내의 원자로 잡음 해석 관련 연구는 한국원자력안전기술원의 고병준 박사의 상호 상관법에 의한 원자력 동특성 연구가 첫 시도로 생각된다.

이후 실험적 고찰에 의한 출력 상승과 잡음 특성에 대한 연구, 운전중



〈그림 3〉 SPND(Self Power Neutron Detector)의 손상시의 신호 예



〈그림 5〉 울진 1호기의 노의 중성자속 신호의 APSD

노내 열수력학적 동특성 연구, 또한 규제 지침(안)의 개발 등의 연구가 한국원자력연구소 및 한국원자력안전기술원 등에서 산발적으로 이루어져 왔다.

원자로 내부 구조물 감시 계통에 대한 체계적인 연구가 비교적 최근 필자의 연구진에 의해 한국원자력연

과 같으며 본 연구에서 대상으로 삼은 울진 1호기의 감시 계통용 계측기의 설치 현황은 〈그림 4〉와 같다.

영광 3·4호기 이전의 원전에는 음향 누설 감시 계통 및 금속 파편 감시 계통이 설치되어 있었으나 잦은 거짓 경보로 인하여 운영에 불편을 초래한 경우가 많았다.

구소에서 수행되어 감시 계통으로부터 나오는 잡음 신호와 구조물의 진동 특성과의 상관 관계에 대한 분석 기술을 정립하고 울진 1호기의 내부 구조물 진동 특성을 밝혀내었으며, 결함을 진단할 수 있는 PC용 소프트웨어를 개발하였다.

또 전력연구원과 공동으로 울진 1호기의 내부 구조물 감시 계통 시스템(Reactor Internals Vibration Monitoring System, RIVMOS)을 개발하여 울진 1호기에 설치하기도 하였으며, 이 결과를 국제 회의(SMORN VII)에 발표하여 국내의 원자로 잡음 해석 관련 연구 활동을 국제적으로 알리는 계기를 마련하였다.

한편 국내 원자력발전소의 감시 계통의 설치 및 운용의 현황을 보면 〈표 2〉

한국원자력연구소가 설계에 참여한 영광 3·4호기 및 울진 3·4호기의 경우, 이들 감시 계통이 NIMS(NSSS Integrity Monitoring System)라는 통합된 계통으로 설치되어 운용되고 있어 이제 각 감시 계통으로부터 베이스라인 데이터를 채취하고 있는 단계이다.

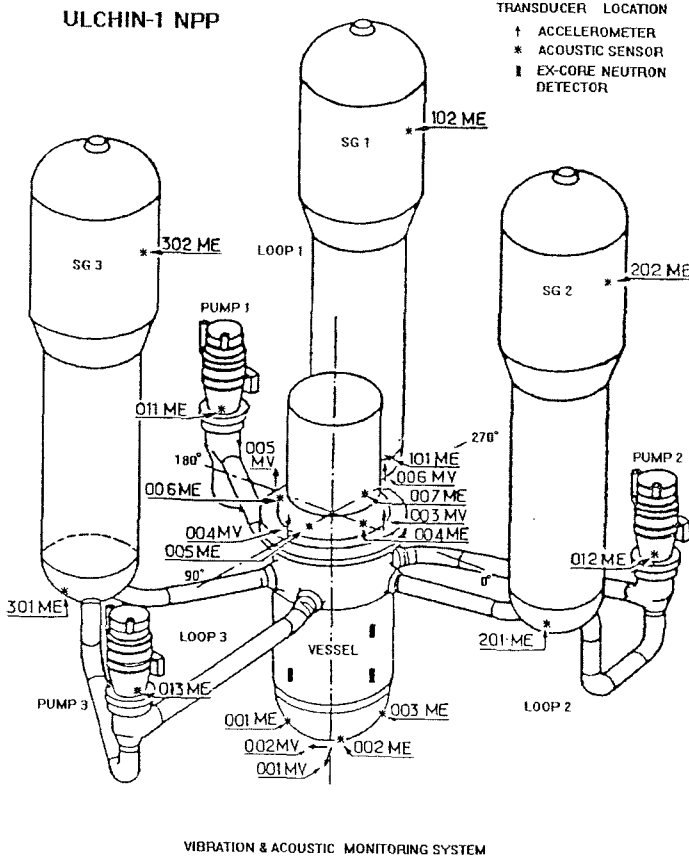
그러나 이들 감시 계통들은 모두 신호를 처리할 수 있는 능력을 갖추고는 있으나 아직 관련 설비의 운영 경험이 부족하고, 또 베이스라인 데이터와 차이가 발생할 경우 이에 대한 물리적인 설명이나 판독할 수 있는 능력은 현재 극히 초보적인 단계에 있는 실정이라 하겠다.

### 연구 발표

본 회의는 5개의 세션으로 나뉘어 제1세션은 일반적인 잡음 해석 문제, 제2세션은 진동 감시, 제3세션은 노심에의 응용, 제4세션은 안정성 해석, 제5세션은 해석 기법의 향상에 대해 연구 결과와 토론이 있었다.

학회 2일째는 오전 논문 발표 후 발렌시아 근처의 Cofrentes 원전(BWR, 950MWe)을 견학하였다.

둘째날에 발표한 필자의 논문은 「Neutron Noise Monitoring in Korean Nuclear Power Plant」로, 한국원자력연구소가 독일 하노버공대 부설 IKPH(원자력기술 및 비파괴시험연구소)와 국제 공동 연구로



(그림 4) 울진 1호기의 각종 감시 계통용 계속기 현황

모드 성분은 20Hz), 이는 이미 수행해 두었던 컴퓨터 해석 결과와 일치하였다.

(그림 5)는 진동 특성을 쉽게 알아볼 수 있는 방안으로 한국원자력연구소에서 개발한 Phase 분리법을 이용하여 계산한 Global 성분, Shell 모드 성분, Beam 1 모드 성분, Beam 2 성분의 자기 파워 스펙트럼(APSD)을 보인 것으로 피크를 보이는 주파수가 그 구조물의 주요 진동 주파수를 나타낸다.

그림을 살펴보면 0~2Hz 및 10~18.5Hz 대역에서는 Global 성분이, 2~9.5Hz 대역에서는 Beam 1, Beam 2 성분이 (3, 6.2, 8.2Hz 에서 봉우리), 그리고 20Hz 부근에서는 Shell 모드 성분이 다른 성분보다 강하게 나타남을 알 수 있다.

노내 중성자 신호에서는 3~5Hz, 5~6.5Hz 근처에서 스펙트럼의 피크가 존재하며, 이는 핵연료 진동 모드로 추정되나 결론 내리기에는 데이터가 더 필요한 것으로 판단되었다.

압력 신호로부터 1차 계통의 음향파 진동수가 약 6.5Hz, 17.5Hz에 존재하는 것을 알았으며, 이는 추후 계통 내의 각종 기기 진단에 고려되어야 할 진동원임을 알았다.

가속도 신호에서는 1·2호기 원자로 압력 용기 외벽에 설치된 각각 6개의 가속도계 중 1호기에서는 2개, 2호기에서는 4개가 불량인 것을 발견하고 발전소 현장에 점검 및 교체

수행하고 있는 「원자로 잡음을 이용한 결함 진단 기술 개발」 과제의 일환으로 한국 원전의 중성자 잡음, 압력, 가속도 신호를 공동 채취하고 분석한 결과를 보인 것이다.

이는 발전소의 허가를 받아 독일과의 공동 명의로 국제 학술 대회에 발표한 것이었다.

대상 원전은 울진 1·2호기(PWR, 950MWe)로 원자로 내부 구조물 및 핵연료의 진동 특성을 파악하기 위하여 노외 중성자 신호, 노

내 중성자 신호, 원자로 압력 용기 외벽에 붙어 있는 가속도계 신호 및 1차 계통의 압력 신호 등을 채취하였다(그림 5).

분석은 한국원자력연구소가 보유하고 있는 신호 분석 시스템 I-DEAS Test 및 독일측의 포터블 분석기로 수행하였다.

그 결과 중성자 잡음 신호 및 가속도 신호로부터 원자로 내부 구조물의 고유 진동수와 진동 모드가 파악되었고(Beam 모드 성분은 8Hz, Shell

권고하였다.

### 회의 참가 소감

이 회의에 참석하는 연구자들은 이미 10년 내지 20년씩 원자로 잡음 분야에서 연구를 수행해 온 사람들로써 상호간에 잘 알고 있었으며, 특히 유럽측은 정보 교환이 매우 빨라 유럽은 이미 하나의 국가라는 느낌을 주었다.

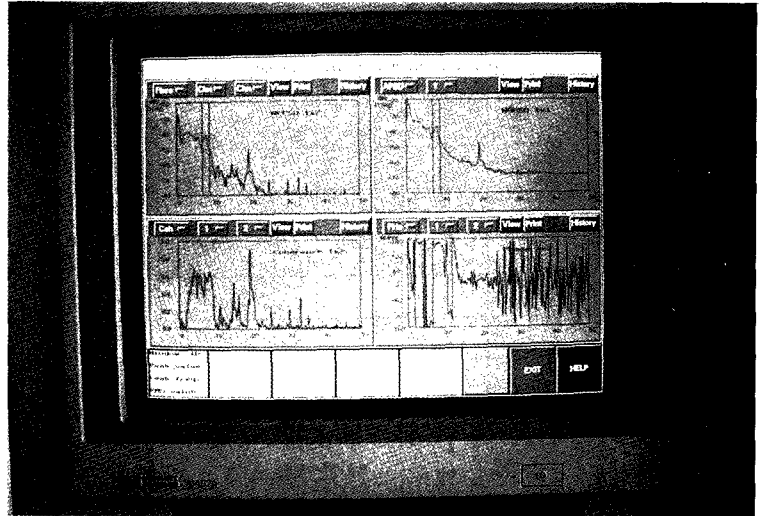
이 분야에 겨우 걸음마를 떴고 있는 한국으로서는 빠른 시일 내에 이들과 정보 교환이 이루어질 수 있도록 노력해야겠다는 생각이 들었다.

특히 본 학회에서의 유럽인들의 빠른 정보 교환은 의사 소통에 전혀 문제가 없는 언어 능력 때문이 아닌가 여겨진다.

본인과 동행한 독일의 Stegemann 교수는 영어뿐 아니라 에스파냐어가 완벽하였으며, 스웨덴에서 온 사람은 폴란드어를, 폴란드에서 온 사람은 러시아어를 구사하는 등 유럽 측 참가자 대부분이 영어는 기본이고 다른 하나의 언어를 완벽하게 함으로써 의사 소통에 전혀 문제가 없는 것이 매우 인상적이었다.

SMORN과 달리 IMORN에서는 논문 발표보다는 토론 위주로 회의가 진행되었는데 이러한 토론이 바로 SMORN 외에 IMORN이 반드시 필요한 이유라고 한다.

특별히 학회 들쭉날에는 Dr. Laggiard(아르헨티나인으로 독일에



경수로 원자로의 내부 구조물 진동 감시 장치(RIVMOS)의 모니터 화면

서 활동중)의 잡음 신호 측정 및 분석을 통한 원자로 감속재의 온도 계수(Moderator Temperature Coefficient, MTC)의 평가에 관한 발표에 대하여 열띤 토론이 있었다.

감속재의 온도 계수는 노심의 온도가 올라가는 과도 상태시 온도에 따른 반응도의 변화 계수로 원자로의 안전 해석에 반드시 필요한 입력 자료로서 지금까지는 이론적으로 계산된 값을 사용하여 왔다.

토론 결과 MTC에 대한 연구가 필요하다고 결론 짓고 연구 추진에 대해 별도로 회의를 갖는 것으로 하였다.

이에 필자는 독일 하노버공대측에 유럽에서 MTC 관련 연구를 추진할 경우 한국도 참여시켜 주도록 요청하였다.

이번 회의는 스페인의 지중해 연안

도시 발레시아에서 열렸는데, 발레시아는 마드리드, 바르셀로나 다음으로 스페인에서 세 번째로 큰 도시라고 하며, 바르셀로나와 함께 카탈라나 지방에 속하여 별도의 자기네 언어를 가지고 있어서 공공 장소(박물관 등)에는 두 개의 언어(에스파냐어 및 카탈라나어)로 설명이 붙어 있었으나 두 언어 모두에 까막눈인 필자에게는 별로 구별이 되지 않았다.

지난 IMORN 회의에서 스페인을 다음 회의 장소로 하자는 제안이 있었을 때 스페인측에서는 조건부 동의 를 하였다라는 후문이 있었다.

그 조건이란 회의 기간을 여름 휴양철은 피한다는 것이었는데, 그 이유인즉 휴양철에 회의를 하면 아무도 회의에 참석하지 않고 해변으로 갈 것이기 때문이라나. ☹